

引文格式: 阳慧, 姜炳春, 唐成, 等. 基于单颗金刚石磨粒磨削的SiC_p/Al复合材料仿真与试验研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 103–109.
YANG Hui, JIANG Bingchun, TANG Cheng, et al. Simulation and experimental study of SiC_p/Al composite based on single abrasive grinding [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 103–109.

基于单颗金刚石磨粒磨削的 SiC_p/Al 复合材料 仿真与试验研究*

阳 慧¹, 姜炳春¹, 唐 成¹, 刘 伟²

(1. 广东科技学院, 东莞 523000;

2. 湖南科技大学, 湘潭 411201)

[摘要] 本文主要开展了单颗金刚石磨粒磨削碳化硅颗粒增强铝基(SiC_p/Al)复合材料的试验及三维有限元仿真研究。分析了SiC_p/Al复合材料磨削过程中磨削工艺参数对磨削力及表面形貌等的影响。分析结果表明,随着磨粒转速的增加,磨削力减小, SiC颗粒破碎现象有所缓解,铝基体的涂覆作用增强,表面形貌完整性好;随着磨削深度的增加,磨削力增大, SiC颗粒破碎明显增强,表面形成较多凹坑与孔洞,表面质量差。仿真结果与试验结果较吻合,说明该仿真模型可用于磨削工艺参数的优化分析。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; 三维有限元仿真; 单颗磨粒; 磨削力; 表面形貌

Simulation and Experimental Study of SiC_p/Al Composite Based on Single Abrasive Grinding

YANG Hui¹, JIANG Bingchun¹, TANG Cheng¹, LIU Wei²

(1. Guangdong University of Science and Technology, Dongguan 523000, China;

2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

[ABSTRACT] The experiment and three-dimensional finite element simulation of single diamond abrasive grinding SiC_p/Al composites are carried out. The effects of grinding parameters on grinding force and surface morphology of SiC_p/Al composites were analyzed. The analysis results show that the grinding force decreases with the grinding speed increasing, the breakage of SiC particles is alleviated, the coating effect of aluminum matrix is enhanced, and the surface morphology integrity is good. The grinding force increases with the grinding depth increasing, SiC particle breakage is significantly enhanced, more pits and holes are formed on the surface, and the surface quality is poor. The simulation results are consistent with the experimental results, which shows that the model can be used to optimize the grinding process parameters.

Keywords: SiC_p/Al composite; Three-dimensional finite element simulation; Single abrasive particle; Grinding force; Surface morphology

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.103

SiC_p/Al 复合材料同时具有铝合金的高韧性、低密度和 SiC 的高强度、耐磨性,广泛应用于航空航天、汽车及军工等领域^[1]。由于 SiC 颗粒的变形和断裂形式与铝合金基体完全不同,因此其加工难度大,加工机理更

为复杂。在过去的几十年里,国内外学者通过仿真与试验对 SiC_p/Al 复合材料的加工工艺和机理进行了研究。Zhou 等^[2]采用随机分布的多颗粒微观二维有限元模型分析了切削参数对 SiC_p/Al 复合材料边缘缺陷尺寸的影响。

* 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ2024); 湖南省教育厅重点项目(18A182); 广东科技学院一般项目(GKY-2021KYYBK-3)。

响。Teng 等^[3]采用 ABAQUS 有限元软件对比了微米、纳米 SiC 颗粒增强铝基复合材料的切削机理,深入分析了刀具-颗粒相互作用、切屑形成机理和表面形貌,结果表明,纳米尺寸的增强材料可以获得更好的加工表面质量。王福松等^[4]建立了 SiC_p/Al 复合材料的二维模型,结合压痕断裂力学理论探讨了压痕应力场和裂纹的形成与扩展,发现当压痕深度超过 0.34 μm 时,Al 基体因局部被压溃而影响了 SiC_p/Al 复合材料的延性去除。Wang 等^[5]建立了二维有限元模型,发现 SiC_p/Al 的铣削过程中,颗粒旋转、拔出、大解理、微破裂等是产生缺陷的主要形式。Zhang^[6]与 Dandekar^[7]等建立了包含界面层的三维模型,研究了 SiC_p/Al 复合材料弹塑性特性和断裂行为,并对颗粒增强金属基复合材料加工亚表面损伤进行了预测。Fathipour 等^[8]建立了二维切削模型,研究了 SiC_p/Al 复合材料的切屑形貌,研究表明,切屑呈锯齿状,且随着切削深度和切削速度的增加,切屑锯齿尺寸增加。但目前针对 SiC_p/Al 复合材料切削加工仿真研究主要集中在二维仿真模型的建立及验证,缺乏对材料切削过程三维整体信息的分析,且对 SiC_p/Al 复合材料的材料去除行为的研究还不够深入。

近年来,单颗磨粒切削仿真与试验已广泛应用于难加工材料的磨削加工机理研究中^[9]。为了简化分析过程,磨粒形状多选用圆锥体^[10-11]、圆锥平载体^[12]、球体^[13-14]等几何体进行模拟,与实际磨粒形状差异较大。刘伟等^[15]通过对磨粒进行观测,发现大多数磨粒呈现较规则的多面体,且建立截角八面体模拟磨粒形态,进行单颗磨粒试验并取得良好成果。本文建立截角八面体几何模型开展单颗磨粒的三维仿真研究,并采用单颗磨粒磨削试验进行验证,深入开展了 SiC_p/Al 复合材料磨削过程中磨削工艺参数对磨削力及表面形貌等的影响研究。

1 试验步骤与仿真建模

1.1 试验步骤

单颗金刚石磨粒选用工业 MBD 型金刚石,粒度为 16 目和 18 目,长沙石立超硬材料有限公司提供,如图 1 (a)所示;建立的截角八面体几何模型如图 1 (b)所示,可见,几何模型与金刚石磨粒实际形态接近,更能实现准确的模拟仿真。单颗磨粒磨削试验在 KVC800/1 立式加工中心进行,并设计制作了单颗磨粒磨削工具。其中,磨削工具的刀柄直径为 15 mm,可安装于机床主轴中;下部分为直径 40 mm 的圆盘,圆盘周向上开有小孔,孔径为 1 mm,孔深为 0.6 mm。利用 AB 胶将金刚石磨粒黏结在小孔中,并保证磨粒出刃高度达到粒径的 2/3。单颗磨粒磨削试验装置如图 2 所示。SiC_p/Al 复

合材料中的 SiC 颗粒体积分数为 45%,物理性能如表 1 所示。试件尺寸为 15 mm × 10 mm × 8 mm。试验利用 Kistler-9253B 三向压电晶体测力仪测量磨削力,通过 PCIMDAS1602/16 数据采集卡进行数据采集,采样频率为 10 kHz;采用 S-8200 扫描电子显微镜观察磨削加工表面形貌。磨削试验采用干式单向逆磨方式,磨削工艺参数见表 2。为了保证试验结果的精准性,在同一参数下进行 3 次试验,取其平均值作为试验结果。

1.2 工件材料模型

利用 ABAQUS/Explicit 建立单颗磨粒磨削 SiC_p/Al

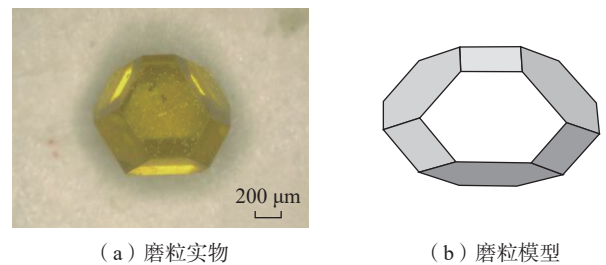


图 1 金刚石磨粒

Fig.1 Diamond abrasive grain



图 2 单颗磨粒磨削加工试验装置图

Fig.2 Experimental device diagram of single abrasive grinding

表 1 SiC_p/Al 复合材料物理性能参数
Table 1 Physical properties of SiC_p/Al composites

参数	值
密度/(kg · m ⁻³)	2700
SiC 颗粒体积分数/%	45
SiC 颗粒平均尺寸/μm	5
弹性模量/GPa	73
泊松比	0.33
比热容/(J · g ⁻¹ · K ⁻¹)	0.8875
热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	180

表 2 磨削工艺参数
Table 2 Grinding process parameters

参数	值
磨粒转速 n/(r · min ⁻¹)	2000, 3000, 4000, 5000
磨削深度 a _p /μm	10, 15, 20, 25

复合材料的三维有限元模型,工件尺寸定义为 $300\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$,由于磨粒为截角八面体,工件为长方体,都具有对称性,为了提高仿真效率,减少有限元仿真单元数目,磨粒与工件取对称一半进行磨削仿真。Johnson-Cook 本构方程综合考虑应变硬化、应变速率效应和热软化效应等因素,被广泛应用于金属切削仿真分析中^[16-18]。本文采用 J-C 本构方程来表征 Al 合金基体在磨削过程中的塑性应变,同时采用 J-C 剪切断裂准则来反映合金基体的切屑形成,铝基体材料模型参数如表 3 所示^[19],同时 SiC 颗粒为脆性材料,在磨削过程中多发生断裂,在本文仿真模型中考虑其断裂现象,采用 ABAQUS/Explicit 中定义的脆性断裂模型模拟 SiC 颗粒断裂失效前,开始断裂时,断裂时效后的材料去除行为。采用最大应力准则对 SiC 颗粒是否产生裂纹继而断裂进行判断, SiC 颗粒材料模型参数分别如表 4 所示^[20]。此外,为模拟 SiC_p/Al 的实际微观结构,采用随机颗粒分散算法^[7]实现体积分数为 45% 的 SiC 颗粒在基体中随机分布。因金刚石磨粒弹性模量与屈服强度都远远大于 SiC_p/Al 复合材料,在磨削过程中基本不变形,所以将其设置为刚体。磨粒与工件之间采用通用接触,磨粒与工件的接触采用库仑摩擦模型,摩擦系数为 0.5^[3]。建立的三维有限元模型如图 3 所示。

1.3 界面属性

近年来,内聚力单元被广泛应用于复合材料界面仿真中^[21-23],此方法假设界面相厚度为 0,两个黏接表面随应力的增加发生分离,位移和应力的关系遵循特定的应力-位移法则,能很好地描述复合材料中基体与颗粒的脱粘现象,因此本文采用一种基于线弹性牵引分离定律的内聚力单元模型^[24],利用二次应力准则确定了界

表 3 铝合金的 J-C 模型参数

Table 3 J-C model parameters of aluminum alloy

参数	值	
强度常量	A/MPa	352
	B/MPa	440
	C	0.083
	m	1
	n	0.42
损伤常量	d_1	0.13
	d_2	0.13
	d_3	-1.5
	d_4	0.011
	d_5	0

面损伤的起始条件^[25],如式(1)和(2)所示:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\sigma_{\max}}{\delta_n^0} \delta & (\delta \leq \delta_n^0) \\ \sigma_{\max} \frac{\delta_n^f - \delta}{\delta_n^f - \delta_n^0} & (\delta > \delta_n^0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\tau = \begin{cases} \frac{\tau_{\max}}{\delta_t^0} \delta & (\delta \leq \delta_t^0) \\ \tau_{\max} \frac{\delta_t^f - \delta}{\delta_t^f - \delta_t^0} & (\delta > \delta_t^0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ 为法向应力值; τ 为切向应力值; δ 为失效裂纹位移值; δ_n^0 (δ_t^0)、 δ_n^f (δ_t^f) 分别为法向(切向)的初始裂纹位移值和法向(切向)的最终裂纹位移值,应力在达到其最大值后,损伤逐渐开始,直至应力为 0 时,裂纹开裂完成,其对应位移值为最终开裂位移,应力与位移关系如图 4 所示。其中,斜率为材料线性刚度;三角形面积为界面断裂所需能量,可以看出,在应力到达最高点时,材料一直处于线弹性状态;而随界面位移逐渐增大后,材料刚度逐渐下降,此应力-位移曲线由界面最大应力、最终开裂位移以及界面断裂能量 3 个物理参数共同决定,其中界面断裂能如式(3)和(4)所示。而根据 Wu 等^[26]的研究结果,断裂能 $50\ \text{J}/\text{m}^2$ 是 SiC_p/Al 复合材料界面的最佳描述。

表 4 SiC 颗粒脆性断裂材料模型参数

Table 4 Model parameters of SiC particle brittle fracture material

参数	数值
剪力传递系数 ρ	1
最大断裂应变系数 e_{\max}^{ck}	0.001
失效裂纹位移 δ	$4e^{-8}$
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3130
杨氏模量/GPa	420
泊松比	0.14
抗拉强度/GPa	1.5
线膨胀系数/ K^{-1}	4.9×10^{-6}

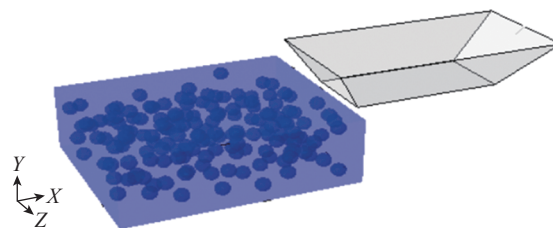


图 3 单颗磨粒磨削 SiC_p/Al 复合材料有限元仿真模型

Fig.3 Finite element simulation model of single grain grinding SiC_p/Al composites

$$\psi_n^c = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_n^f \quad (3)$$

$$\psi_t^c = \frac{1}{2} \tau_{\max} \delta_t^f \quad (4)$$

式中, ψ_n^c 为法向方向断裂能; ψ_t^c 为切向方向断裂能。

2 结果与讨论

为保证仿真与试验的磨削加工参数一致, 仿真模型

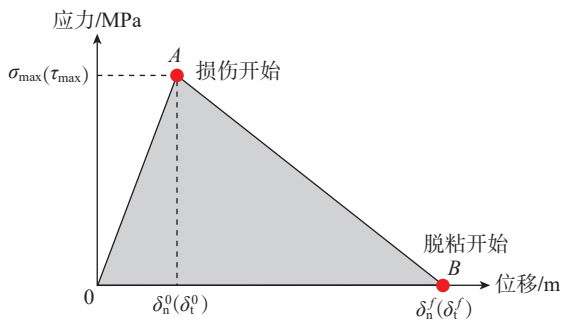
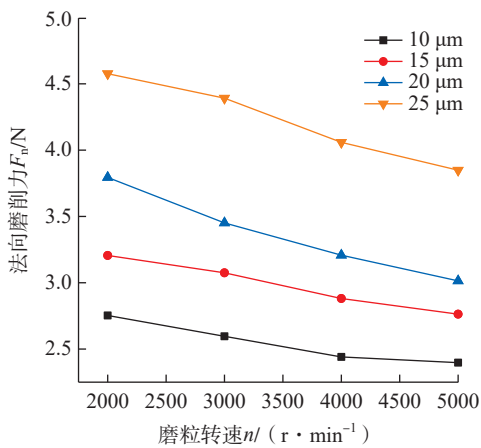
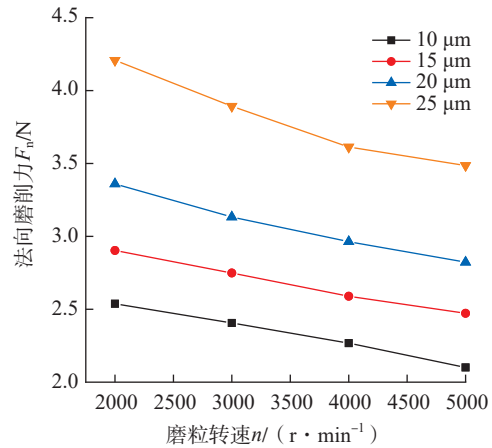


图4 内聚力单元应力-位移曲线

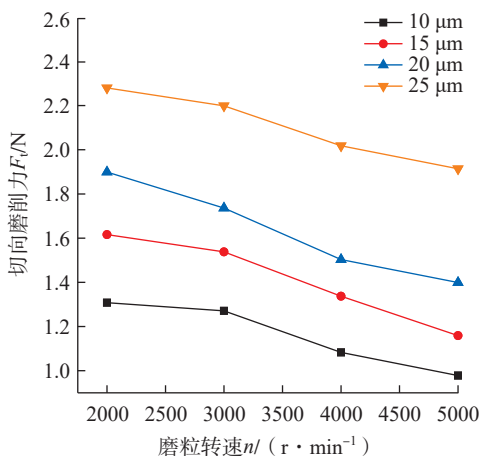
Fig.4 Stress-displacement curve of cohesive element



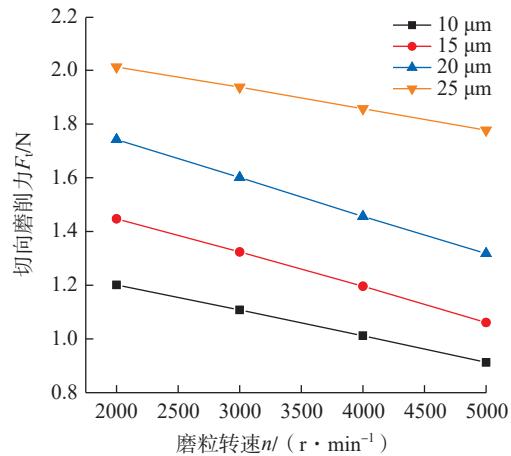
(a) 试验法向磨削力



(b) 仿真法向磨削力



(c) 试验切向磨削力



(d) 仿真切向磨削力

图5 磨削力 F 与磨粒转速 n 关系

Fig.5 Relationship between grinding force F and abrasive speed n

中采用砂轮速度代替磨粒的切削速度, 截取磨粒完全切入的稳定切削过程进行分析。

2.1 磨削参数对磨削力的影响

采用试验与仿真手段研究了磨粒转速对磨削力的影响规律, 如图5所示。可以发现, 随着磨粒转速的增大, 法向力与切向力均不同幅度减少。以磨削深度为 $10 \mu\text{m}$ 为例, 当磨粒转速从 2000 r/min 增大到 5000 r/min 时, 法向磨削力由 2.75 N 降低至 2.40 N , 降低了 12.7% , 而切向磨削力从 1.31 N 降至 0.98 N , 降低了 25.2% 。这是因为磨削速度越大, 单位时间内所去除的工件厚度变小, 并且随着磨粒的持续切入, 磨粒与工件之间的相互作用也导致磨削区域温度升高, 造成材料软化, 从而磨削力随磨削速度的增大而减小。

从图6中可观察到, 磨削力随着磨削深度的增大而增大。当磨粒转速为 2000 r/min 时, 随着磨削深度从 $10 \mu\text{m}$ 逐步增至 $25 \mu\text{m}$, 法向磨削力由 2.75 N 增大至 4.56 N , 增长幅度为 65.8% , 切向磨削力由 1.31 N 增大至 2.28

N,增大幅度为 74.0%。这是因为随磨削深度的增加,磨粒与工件之间的接触面积越大,接触弧长越长,磨粒所需克服的塑性应变和阻力也随之增大。

根据图 5 和 6 分析得出,所有参数下的法向力和切向力误差都不超过 12%,表明上述有限元仿真模型的正确性。

2.2 磨削加工表面形貌分析

当单颗磨粒加工 SiC_p/Al 复合材料时,磨粒依次磨削 Al 基体与 SiC 颗粒增强相,使工件在磨削后形成的表面与单纯的 Al 合金磨削表面截然不同,工件表面不仅会出现 Al 基体磨削产生的划痕与涂覆,还会因 SiC 颗粒的存在影响加工表面缺陷的形成。图 7 分别是磨削深度为 $25\ \mu\text{m}$,不同转速下 SiC_p/Al 复合材料磨削加工后的微观表面形貌。当转速为 $2000\ \text{r/min}$ 时,工件表面存在较多的凹坑,且加工缺陷多集中在垂直磨削方向的基体与颗粒界面处,表面加工质量较差,如图 7 (a) 所示;当磨粒转速 $3000\ \text{r/min}$ 时,表面依旧留有较多凹坑,并伴随着犁沟缺陷,但凹坑尺寸相对较小,如图 7 (b) 所示;随着转速的进一步增大,铝基体的涂覆区域较大, SiC 颗粒去除平整,表面加工质量变好,虽存在凹

坑,但数目少且尺寸相对较小,如图 7 (c) 和 (d) 所示。这主要是因为随磨粒转速的增大,磨削力相应减少, SiC 颗粒产生破碎形成凹坑的现象也逐渐减少。同时,磨粒单位时间磨削工件的次数增加,工件磨削区域温度升高,铝基体变软,塑性流动性增强, Al 基体的涂覆作用掩盖部分缺陷,使表面加工质量变好。因此,在保持其他磨削工艺参数不变时,为得到较好的加工表面,应选取较大的磨粒转速。

图 8 为磨粒转速 $2000\ \text{r/min}$,不同磨削深度下 SiC_p/Al 复合材料磨削微观表面形貌情况。从图 8 (a) 可以看出,被加工表面颗粒局部破碎以及脱落形成的凹坑数量较少,说明在该磨削工艺参数下,磨削力较小,产生的应力值较低,材料中的 SiC 颗粒多以塑性变形去除;随着磨削深度的增大,磨削力增大,导致应力值达到 SiC 颗粒破碎临界点产生破碎并部分出现脱离现象,工件表面凹坑数量较多,加工表面也存在颗粒压入现象, SiC 颗粒的去除方式为塑性变形与脆性断裂共存,如图 8 (b) 所示;当磨削深度增至 $20\ \mu\text{m}$ 时,加工表面凹坑明显增多, SiC 颗粒破碎严重,这是因为随着磨削深度的增加,磨削力大幅增加,铝基体与 SiC 颗粒界面产生失效, SiC

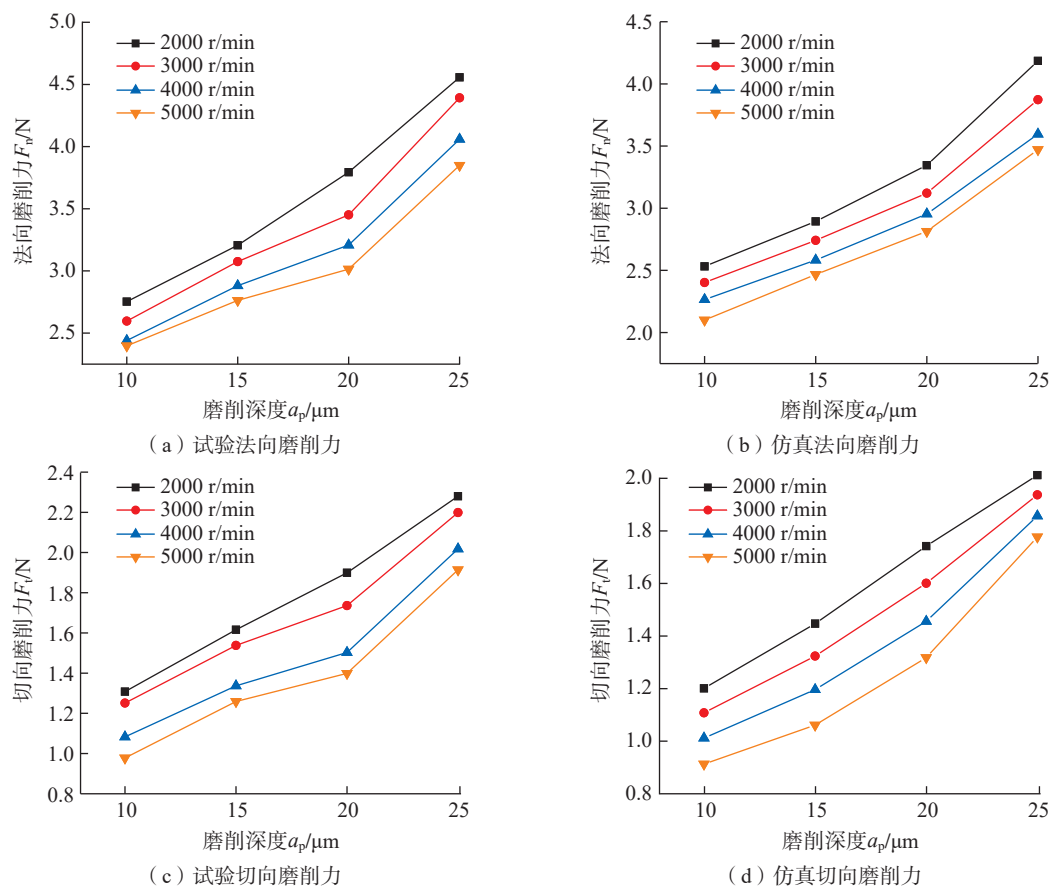


图 6 磨削力 F 与磨削深度 a_p 关系

Fig.6 Relationship between grinding force F and grinding depth a_p

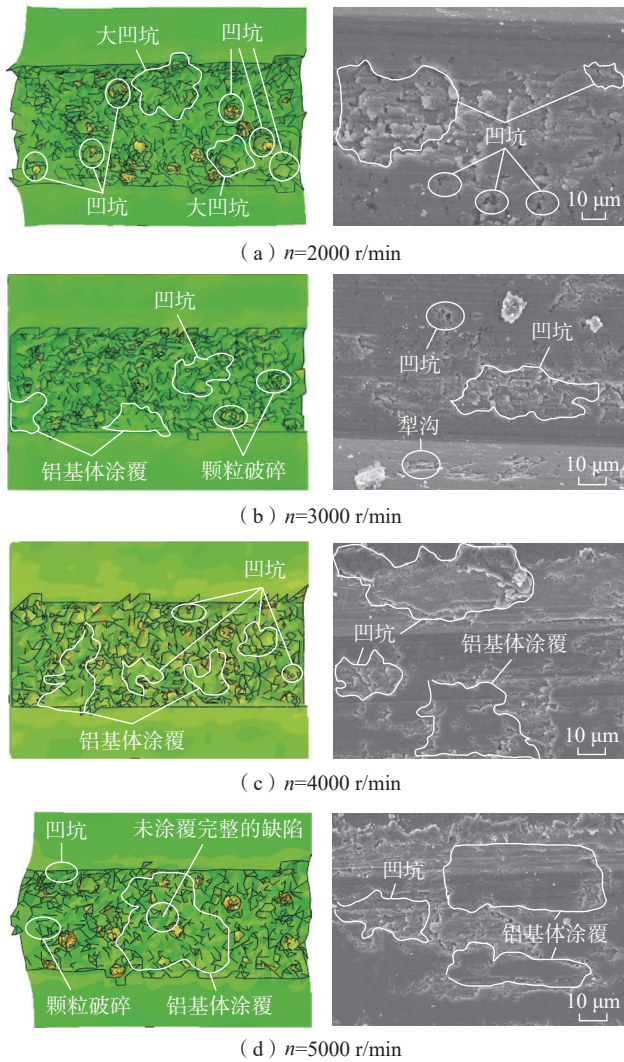


图7 不同磨粒转速下 SiC_p/Al 复合材料微观表面形貌 ($a_p=25 \mu\text{m}$)
Fig.7 Micro surface morphology of SiC_p/Al composite under different abrasive rotation speed ($a_p=25 \mu\text{m}$)

颗粒多以脆性断裂和剥落方式去除,如图8(c)所示;随着磨削深度的进一步增大,加工表面凹坑数量多且尺寸较大(凹坑尺寸一般大于 $10 \mu\text{m}$),这是因为此磨削状态下,金刚石磨粒与 SiC 颗粒之间相互作用增强, SiC 颗粒与铝基体的结合面破坏力度更大,更多 SiC 颗粒产生破碎脱离表面,最终形成尺寸较大的凹坑。对比试验观测的表面形貌与仿真结果,发现两者表面形貌及缺陷形态相似,说明本文建立的仿真模型可用于 SiC_p/Al 复合材料加工表面形貌的预测,为研究 SiC_p/Al 复合材料的去除机理奠定了基础。

3 结论

结合单颗磨粒磨削试验与有限元仿真方法研究了 SiC_p/Al 复合材料加工过程中磨削参数对磨削力及表面形貌的影响规律,得到以下 3 点结论。

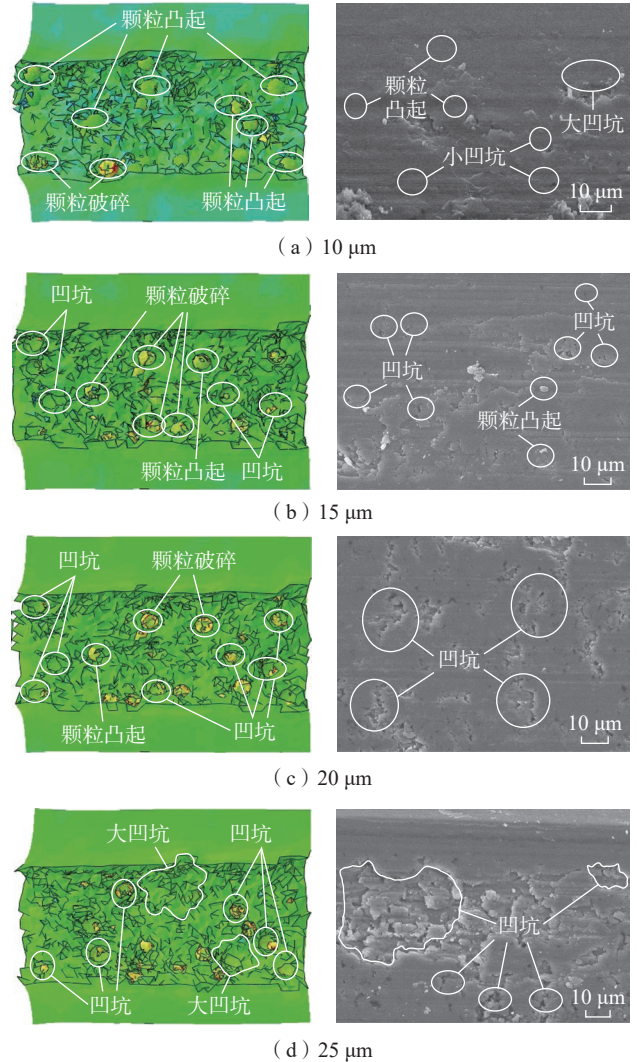


图8 不同磨削深度下 SiC_p/Al 复合材料微观表面形貌 ($n=2000 \text{ r/min}$)
Fig.8 Micro surface morphology of SiC_p/Al composite under different grinding depth ($n=2000 \text{ r/min}$)

(1) 磨削力随着磨粒转速的增大而减小,随磨削深度的增加而增大,且磨削深度对磨削力的影响大于磨粒转速的影响。

(2) 磨粒转速越高,磨削力越小,颗粒破碎现象减少,同时 Al 基体塑性流动和涂覆作用增强,掩盖部分缺陷;随着磨削深度的增大, SiC 颗粒产生破碎和脱离现象,工件表面凹坑和缺陷增多。

(3) 磨削力与磨削形貌的仿真结果与试验结果相符,验证了仿真模型的正确性,可利用此模型优化磨削工艺参数。

参考文献

[1] MOSES J J, DINAHARAN I, SEKHAR S J. Prediction of influence of process parameters on tensile strength of AA6061/TiC aluminum matrix composites produced using stir casting[J]. Transactions

of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(6): 1498–1511.

[2] ZHOU L, WANG Y, MA Z Y, et al. Finite element and experimental studies of the formation mechanism of edge defects during machining of SiC_p/Al composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 84: 9–16.

[3] TENG X Y, CHEN W Q, HUO D H, et al. Comparison of cutting mechanism when machining micro and nano-particles reinforced SiC/Al metal matrix composites[J]. Composite Structures, 2018, 203: 636–647.

[4] 王福松, 黄树涛, 周丽, 等. SiC_p/Al 复合材料磨削加工去除机理的有限元分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(4): 37–41, 45.

WANG Fusong, HUANG Shutao, ZHOU Li, et al. Finite element simulation of removal mechanism during grinding of SiC_p/Al composites[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(4): 37–41, 45.

[5] WANG T, XIE L J, WANG X B. Simulation study on defect formation mechanism of the machined surface in milling of high volume fraction SiC_p/Al composite[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5): 1185–1194.

[6] ZHANG J F, ZHANG X X, WANG Q Z, et al. Simulations of deformation and damage processes of SiC_p/Al composites during tension[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(4): 627–634.

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

[8] FATHIPOUR M, HAMED M, YOUSEFI R. Numerical and experimental analysis of machining of Al (20 vol% SiC) composite by the use of ABAQUS software[J]. Materials Science & Engineering Technology, 2013, 44(1): 14–20.

[9] 黄辉, 林思煌, 徐西鹏. 单颗金刚石磨粒磨削玻璃的磨削力研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(11): 1278–1282.

HUANG Hui, LIN Sihuang, XU Xipeng. Study on grinding forces for glass grinding with single diamond grit[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(11): 1278–1282.

[10] 王君明, 叶人珍, 汤漾平, 等. 单颗磨粒的平面磨削三维动态有限元仿真[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 29(5): 41–45.

WANG Junming, YE Renzhen, TANG Yangping, et al. 3D dynamic finite element simulation analysis of single abrasive grain during surface grinding[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009, 29(5): 41–45.

[11] 言兰, 姜峰, 融亦鸣. 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 172–182.

YAN Lan, JIANG Feng, RONG Yiming. Grinding mechanism based on single grain cutting simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 172–182.

[12] AXINTE D, BUTLER-SMITH P, AKGUN C, et al. On the influence of single grit micro-geometry on grinding behavior of ductile and brittle materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 74: 12–18.

[13] 张勇强, 汪久根, 陈芳华, 等. 磨粒磨损的磨粒接触热分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(10): 1–5.

ZHANG Yongqiang, WANG Jiugen, CHEN Fanghua, et al. Thermal analysis of debris contact in abrasive wear[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(10): 1–5.

[14] FANG L, CEN Q H, SUN K, et al. FEM computation of groove ridge and Monte Carlo simulation in two-body abrasive wear[J]. Wear, 2005, 258(1–4): 265–274.

[15] 刘伟, 邓朝晖, 万林林, 等. 单颗金刚石磨粒切削氮化硅陶瓷仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 191–198.

LIU Wei, DENG Zhaohui, WAN Linlin, et al. Simulation and experiment study for silicon nitride cutting with single diamond grain[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 191–198.

[16] DAI J B, DING W F, ZHANG L C, et al. Understanding the effects of grinding speed and undeformed chip thickness on the chip formation in high-speed grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5–8): 995–1005.

[17] 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.

[18] LIU C J, DING W F, YU T Y, et al. Materials removal mechanism in high-speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites[J]. Precision Engineering, 2018, 51: 68–77.

[19] MABROUKI T, GIRARDIN F, ASAD M, et al. Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024–T351)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(11): 1187–1197.

[20] 武永祥. SiC_p/Al 复合材料切削仿真研究与实验验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

WU Yongxiang. Research on the cutting simulation of SiC_p/Al composite and experimental verification[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[21] DANDEKAR C R, SHIN Y. Molecular dynamics based cohesive zone law for describing Al–SiC interface mechanics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(4): 355–363.

[22] SHAO J C, XIAO B L, WANG Q Z, et al. An enhanced FEM model for particle size dependent flow strengthening and interface damage in particle reinforced metal matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(1): 39–45.

[23] ZHANG J, OUYANG Q B, GUO Q, et al. 3D Microstructure-based finite element modeling of deformation and fracture of SiC_p/Al composites[J]. Composites Science and Technology, 2016, 123: 1–9.

[24] GEUBELLE P H, BAYLOR J S. Impact-induced delamination of composites: A 2D simulation[J]. Composites Part B: Engineering, 1998, 29(5): 589–602.

[25] YUAN M N, YANG Y Q, LI C, et al. Numerical analysis of the stress–strain distributions in the particle reinforced metal matrix composite SiC/6064Al[J]. Materials & Design, 2012, 38: 1–6.

[26] WU Q, XU W X, ZHANG L C. Microstructure-based modelling of fracture of particulate reinforced metal matrix composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 163: 384–392.

通讯作者: 阳慧, 硕士, 研究方向为难加工材料高效精密加工技术。

(责编 七七)