

基于有限元仿真铝基碳化硅磨削参数研究

倪安杰

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年12月11日; 录用日期: 2023年12月28日; 发布日期: 2024年1月25日

摘要

为获得低磨削比能下磨削加工铝基碳化硅(SiCp/Al)的磨削参数, 通过有限元仿真研究不同磨削深度、进给速度以及主轴转速对磨削力的影响规律, 揭示磨削参数对磨削力大小以及SiC颗粒失效形式的影响, 结合实际磨削加工, 验证仿真模型的准确性并对材料表面粗糙度进行测量。结果表明: 磨削深度对材料的表面粗糙度和磨削力的影响权重最大, 降低磨削深度可以显著减小磨削力并降低表面粗糙度。同时, 提高主轴转速或降低进给速度, 能够在减小磨削力的同时降低表面粗糙度。本文考虑到磨削比能的因素, 选用20 μm 的磨削深度、70 mm/min的进给速度和3000 r/min的主轴转速(即磨削线速度1.57 m/s)时, 磨削比能仅为2721.70 J/mm³, 有效降低了磨削比能。

关键词

铝基碳化硅, 磨削加工, 磨削比能

Research on Grinding Parameters of Aluminum-Based Silicon Carbide Based on Finite Element Simulation

Anjie Ni

School of Mechanical & Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai

Received: Dec. 11th, 2023; accepted: Dec. 28th, 2023; published: Jan. 25th, 2024

Abstract

In order to obtain the grinding parameters of aluminum-based silicon carbide (SiCp/Al) grinding with low energy consumption, the influence law of different grinding depths, feed speed and spindle speed on the grinding force was studied by finite element simulation, and the influence of grinding parameters on grinding force and SiC particle failure form was revealed. Verify the accu-

racy of the simulation model and measure the surface roughness of the material. The results show that grinding depth has the greatest influence on surface quality and grinding force, and reducing grinding depth can significantly reduce grinding force and surface roughness. At the same time, increasing the spindle speed or reducing the feed speed can reduce the surface roughness while reducing the grinding force. Considering the factor of energy consumption, when the grinding depth of 20 μm , the feed speed of 70 mm/min and the spindle speed of 3000 r/min (that is, the grinding line speed of 1.57 m/s) are selected, the specific grinding energy is only 2721.70 J/mm³, which effectively reduces the specific grinding energy.

Keywords

Aluminum Based Silicon Carbide, Grinding Processing, Grinding Specific Energy

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳化硅颗粒增强铝基复合材料 SiCp/Al 融合了金属和陶瓷的材料特性, 具有高比强度、高比刚度、高耐磨性、高耐腐蚀性、良好的导热导电性能及高抗疲劳性能等特点, 在各种领域中被广泛应用, 并在航空航天、国防军事以及半导体等行业中具有巨大的应用前景[1] [2]。当涉及到 SiCp/Al 复合材料的加工, 由于基体中存在大量的 SiC 增强颗粒, 材料的各向异性和非均质性导致其加工性能较差, 加工成本高、精度低和表面粗糙度值大等问题, 使得材料加工面临着诸多挑战[3] [4] [5]。目前常用的碳化硅铝基复合材料加工方法包括磨削、切削和铣削加工等, 其中, 磨削是实现材料高效、优质的主流加工方法之一, 国内外学者对 SiCp/Al 复合材料的加工性能进行了丰富的研究。Tao Wang 建立了二维微观有限元模型, 研究了 SiCp/Al 复合材料微观的铣削过程中 SiC 的破碎、脱落、微裂纹是缺陷形成的主要机制[6]。Jie Zhang 采用 Camisizer XT 粒度分析装置和随机顺序吸附算法进行了材料的三维微观结构重构, 探究了金属基体弹塑性损伤、增强颗粒的脆性破坏和界面的牵引分离的本构行为[7]。Junwei Liu 建立有限元模型研究了在加工过程中, 切削速度和刀具与颗粒的相互作用位置对表面形成的影响。目前大部分研究工作集中在低体积分数铝基复合材料的切削加工中, 对于高体积分数铝基复合材料磨削方法的加工研究较少[8]。

本文对高体积分数(55%) SiCp/Al 复合材料进行仿真模拟以及实验对比, 对加工过程中的磨削力、能耗进行评价, 讨论了磨削参数对材料失效形式、磨削力的影响。这些研究结果为利用磨削技术实现 SiCp/Al 复合材料的精密加工、绿色制造提供重要指导。

2. 仿真实验过程

2.1. 有限元仿真模型的建立

本研究使用 ABAQUS 软件, 建立如图 1 所示的 SiCp/Al 复合材料以及刀具二维微观有限元模型, 对材料进行有限元分析并提取不同加工参数下的磨削力。模型基体材料为 Al, 尺寸为 1 mm × 0.5 mm, 基体内离散地分布着 SiC 增强颗粒, 颗粒粒径为 40~60 μm 四至六边形。磨削过程所用磨粒为三棱锥形金刚石磨粒, 研究中忽略磨粒磨损, 故在二维模型中将磨粒简化为顶角为 50° 的三角形, 且定义为解析刚性。仿真过程中, 工件 X、Y 方向的位移被限制, 金刚石磨粒以 10~100 mm/min 的恒定速度沿 X 方向划擦移

动。工件自身的铝基体和碳化硅颗粒始终保持自接触，磨粒会在划擦运动时和工件不同位置产生表面接触。

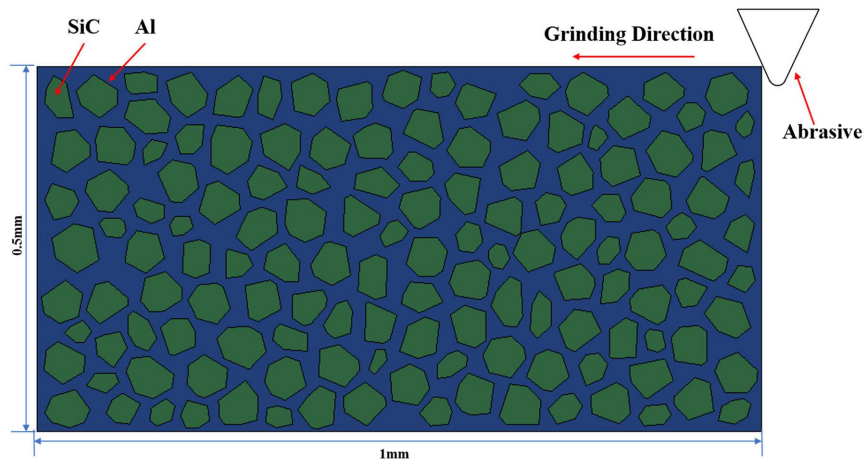


Figure 1. 55% volume fraction SiCp/Al finite element model
图 1. 55%体积分数的 SiCp/Al 有限元模型

2.2. 材料本构模型建立

由于 SiCp/Al 为复合材料，涉及软质铝基体和硬脆性碳化硅颗粒两种材料，二者的物理和力学性能差异较大，具体参数见表 1。

Table 1. Physical and mechanical properties of Al matrix and SiC particles
表 1. Al 基体和 SiC 颗粒物理力学性能参数

参数	Al 基体	SiC 颗粒
密度(kg/m ³)	2.7×10^3	3.2×10^3
杨氏模量(GPa)	73.4	420
泊松比	0.33	0.1
热传导率(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	180	81
热膨胀系数(K ⁻¹)	23.6×10^{-6}	4.9×10^{-6}
比热容(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	880	427

Al 基体由于其较低的杨氏模量，在磨削受力状态下会弹塑性变形，同时磨削过程中会由于机械能的转换和磨粒与材料之间的摩擦，容易产生温升效应。考虑到材料的这些特点，选择描述材料热-弹(粘)塑性关系的本构模型 Johnson-Cook [9]来定义 Al 基体的力学属性，其本构方程如下式：

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

$$\theta_r^* = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} \quad (2)$$

式中： σ - 流动应力(MPa)； A - 屈服应力(MPa)； B - 幂指前系数； n - 材料硬化系数； c - 应变率强化指

数; m - 温度敏感常数; $\dot{\epsilon}_0$ - 应变率敏感系数(s^{-1}); $\dot{\epsilon}$ - 应变速率(s^{-1}); ϵ - 应变; θ_r - 环境温度; θ_m - 熔点温度。本文所使用的 J-C 模型参数如表 2 所示。

Table 2. Parameters of the Johnson-Cook constitutive model of Al matrix
表 2. Al 基体 Johnson-Cook 本构模型参数

A/MPa	B/MPa	n	C	m	θ_r	θ_m
426	265	0.34	0.015	1.59	290	775

选择可以获得磨削过程中的断裂失效行为的 JH-2 模型[10]来作为 SiC 增强颗粒的本构模型, 该模型考虑了裂纹扩展和破碎的过程, 此外该模型还考虑了应变速率、温度和压力对材料的性能影响。模型标准化无损应力的表达式为:

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3)$$

标准化破碎应力的表达式为:

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (4)$$

式中: A - 初始强度常数; B - 断裂强度常数; C - 应变速率常数; M - 断裂强化指数; N - 初始强化指数; T - 标准化抗拉强度, 破碎材料标准化应力还需要限制为 $\sigma_f^* \leq \sigma_{\max}^*$, 选用 σ_{\max}^* 可以更好的为模型提供灵活性。本构模型参数如表 3 所示。

Table 3. Parameters of SiC particle JH-2 constitutive model
表 3. SiC 颗粒 JH-2 本构模型参数

A	B	C	M	N	σ_{HEL}/GPa	P_{HEL}/GPa	T/GPa
0.95	0.35	0.009	1.0	0.65	11.7	5.13	0.75

2.3. 磨削仿真方案

本模型并不考虑主轴振动, 材料本身的不同合成方式以及刀具磨损等因素, 只考虑工件的进给速度以及磨粒的磨削深度这两种变量。仿真参数如下表 4 所示。

Table 4. Grinding simulation parameters
表 4. 磨削仿真参数

类型	参数
工件进给速度 v_f	10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 mm/min
磨削深度 a_p	10、20、30 μm

2.4. 磨削加工方案

磨削实验所用样品为体积分数约 55% 的 SiCp/Al 复合材料, 增强 SiC 颗粒等效粒径为 40~60 μm , 工件尺寸 50 mm \times 50 mm \times 2.7 mm 如图 2 所示, 在德国 DMC650V 高速立式加工中心(如图 3 所示)上使用 ER25 刀柄安装直径为 12 mm 的电镀金刚石砂轮, 砂轮磨粒粒度为 400 目(38 μm), 并采用 Kistler 测力仪采集磨削过程中的 X、Y、Z 三轴力信号, 磨削加工参数如表 5 所示。

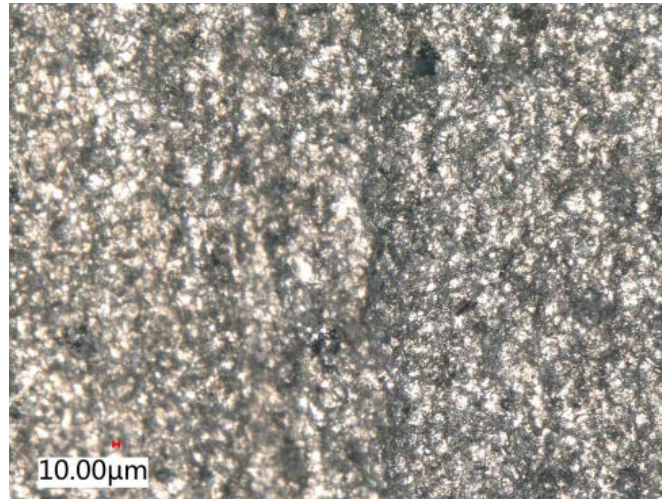


Figure 2. Microstructure of SiCp/Al composite
图 2. SiCp/Al 复合材料的微观结构

Table 5. Grinding processing parameters
表 5. 磨削加工参数

参数类型	实验参数
磨削速度 [*] (m/s)	1.57、3.4、5.23
进给速度(mm/min)	40、70、100
磨削深度(μm)	10、20、30

注：^{*}磨削速度 1.57 m/s、3.4 m/s、5.23 m/s 分别由砂轮直径 12 mm 和主轴转速 3000、6500、10,000 r/min 换算得到。

3. 结果与分析

3.1. 有限元仿真结果

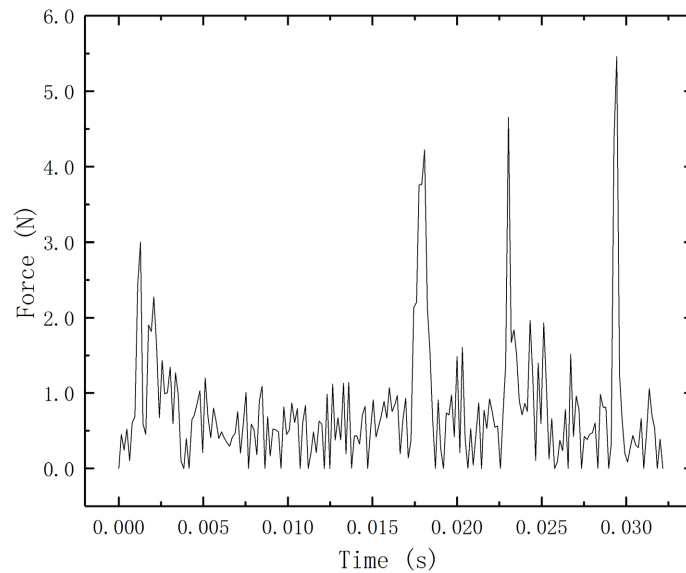


Figure 3. Time sequence diagram of grinding force simulation
图 3. 磨削力仿真时序图

通过将金刚石磨粒设置为磨削力采集点, 获得每组加工参数时不同的切向与法向磨削力分量, 通过数据处理得到总磨削力时序图如图 4 所示。磨削力随磨削力、进给速度之间的关系如图 5 所示, 当磨削深度一定时, 磨削力随着进给速度的增加呈现增加趋势, 但在进给速度较小时($v_f = 10\sim 30$ mm/min)磨削力的上升趋势较为缓慢, 这可能是在此进给速度范围下, 增强颗粒的失效形式未发生较大变化导致; 在中进给速度下($v_f = 30\sim 70$ mm/min)磨削力上升速度根据不同磨削深度有所变化, 但整体趋势向上, 这其中可能包括增强颗粒的弹性失效转变, 从磨削深度和进给速度两方面产生的失效差异性; 在 $v_f = 80$ mm/min 时三种不同磨削深度的磨削力都出现了下降的情况, 这可能是由于该进给速度下增强颗粒被拔出现象严重, 在仿真过程中, 磨粒将会出现不与材料接触的情况; 最终在高进给速度($v_f = 80\sim 100$ mm/min)下磨削力极速上升, 可能是由于在此进给速度下, 增强颗粒的失效形式累加, 导致材料在单位时间内失效加剧。

图 6 为进给速度 60 mm/min, 磨削深度为 30 μm 时的 SiCp/Al 材料不同磨削时间(接触位置)的工件形貌图。如(图 6(a))所示, 磨粒在未接触到增强颗粒前, 颗粒保持形态完整(红色虚线标注处), 最大磨削力出现在增强颗粒靠近磨粒尖端处, 此时铝基体在磨粒的进给与压入作用下发生塑性变形(本章设置材料超过变形理论后单元删除)。随着磨粒的进给, 磨粒划擦过铝基体接触至界面, 此时界面将会收到拉压应力, 最终出现界面损伤, 将会使增强颗粒暴露出来, 最大磨削力出现在增强颗粒的大片区域内(途中红色圆圈标注), 这将会是增强颗粒断裂的前兆如(图 6(b))。随着磨粒继续进给, 界面所受应力超过失效值, 铝基体与增强颗粒将会出现界面分离现象, 磨粒会与增强颗粒进行接触, 增强颗粒的表面被磨粒的锐角处破开裂纹, 铝基体也在界面破坏下出现牵连损伤, 并在颗粒内部(刀具接触点垂直于颗粒边线上)出现最大磨削力如(图 6(c))。最终, 当磨粒进给到增强颗粒的中间, 裂纹将会沿上述最大磨削力出现位置与刀具顶角连线快速增大, 使颗粒从内部破碎直至磨粒离开增强颗粒区域, 此时磨削力最大值出现在距离刀具顶角最远处的磨粒边线上(图 6(d)), 磨粒还将继续与铝基体进行接触, 直到下一轮的颗粒失效。

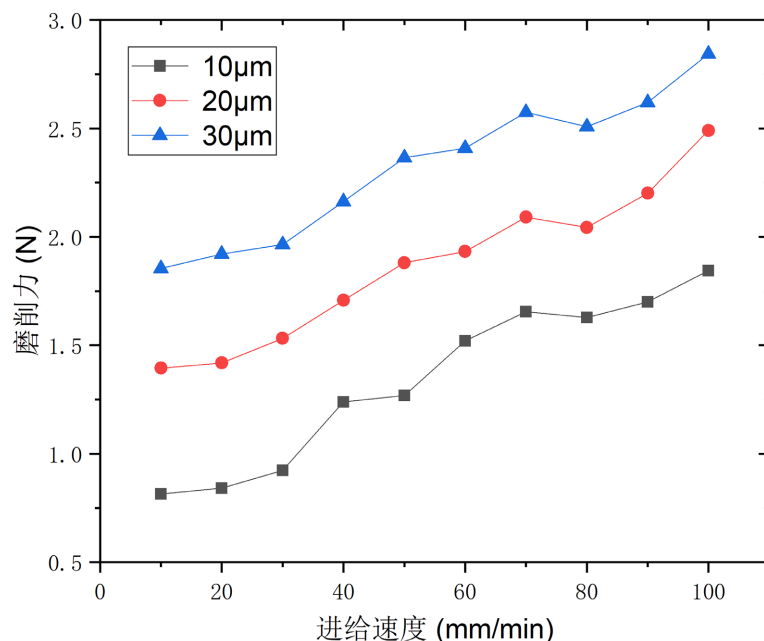
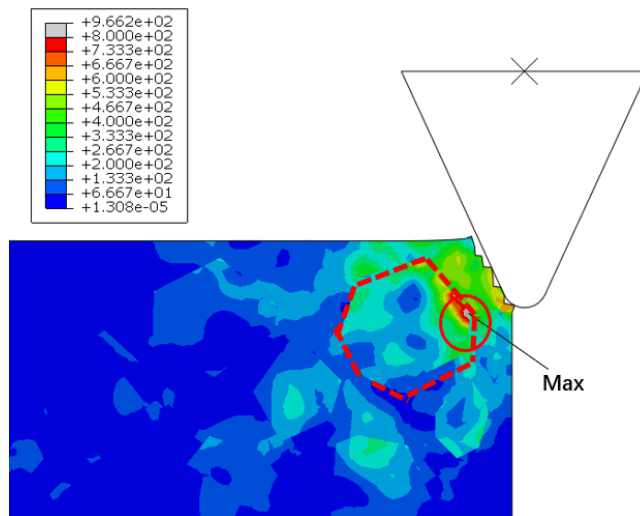
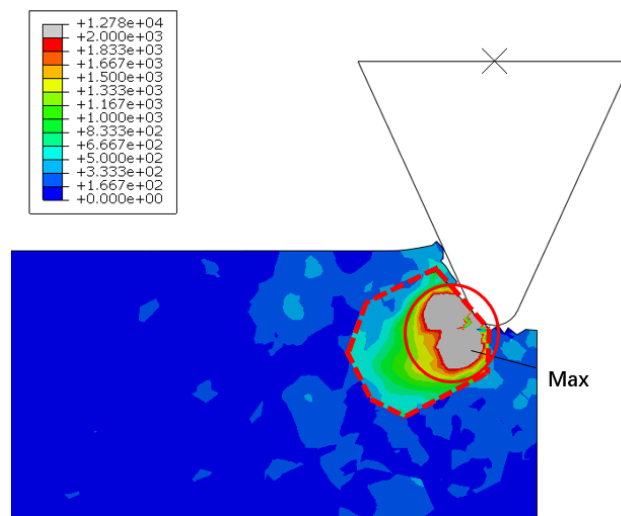


Figure 4. Relationship between grinding force and machining parameters

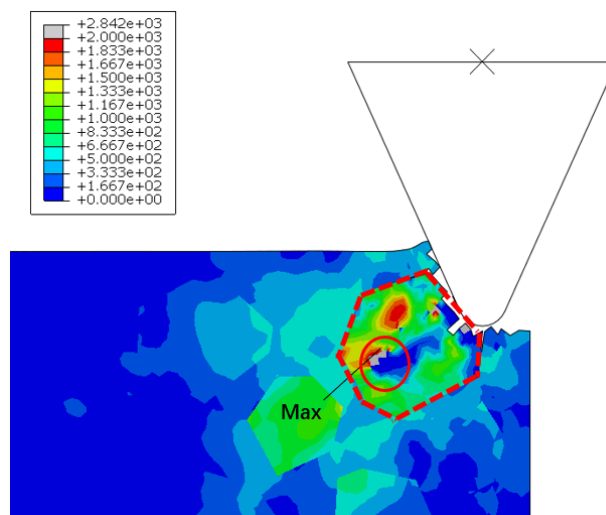
图 4. 磨削力与加工参数的关系



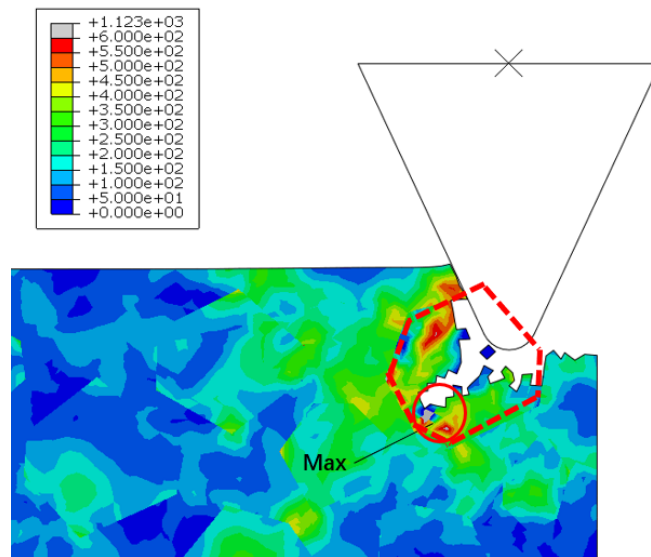
(a) 磨粒接触到增强颗粒前



(b) 磨粒与增强颗粒初始接触



(c) 颗粒随裂纹扩大出现内部破碎



(d) 磨粒离开增强颗粒区域

Figure 5. Mixed area of aluminum matrix and reinforced particles removed by abrasive particles
图 5. 磨粒去除铝基体和增强颗粒混合区域

3.2. 磨削实验与仿真实验对比

使用表 5 中的加工参数，对 SiCp/Al 复合材料进行磨削加工并采取过程中的磨削力，不同磨削参数下的实验结果见表 6。

Table 6. Grinding parameters and results
表 6. 磨削加工参数及结果

样品编号	磨削速度*(m/s)	进给速度(mm/min)	磨削深度(μm)	粗糙度(μm)	磨削力(N)
#1	1.57	70	20	0.718	1.618
#2	3.4	70	20	0.761	1.508
#3	5.23	70	20	0.608	1.157
#4	3.4	10	20	0.492	0.819
#5	3.4	40	20	0.612	1.315
#6	3.4	100	20	0.907	2.248
#7	3.4	40	10	0.416	0.635
#8	3.4	40	30	1.089	2.376

将仿真所得磨削力与实际磨削加工所产生磨削力进行对比，结果如图 6 所示。结果表明，随磨削深度和进给速度的增加，仿真与实测磨削力均呈现上升趋势，且仿真结果与实测结果误差介于 7.7%~15.7%，证明二者吻合度较高，仿真对实际磨削力有参考意义。

通过超景深显微镜(VHX-6000, 600×)观测加工后的表面形貌如图 8 所示，并记录其表面粗糙度大小见表 6。

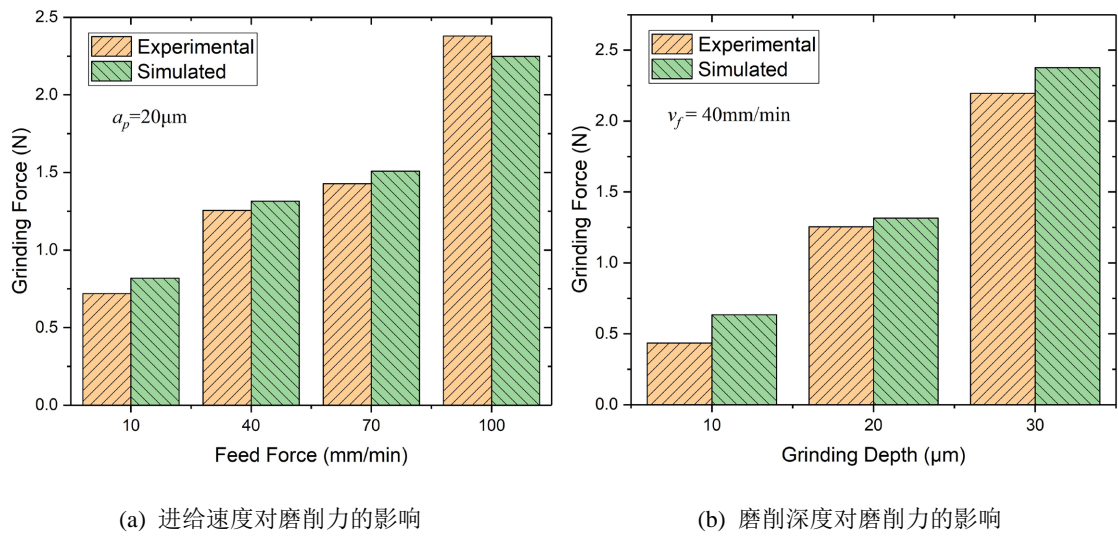


Figure 6. Changes of grinding force with processing parameters
图 6. 磨削力随加工参数的变化规律

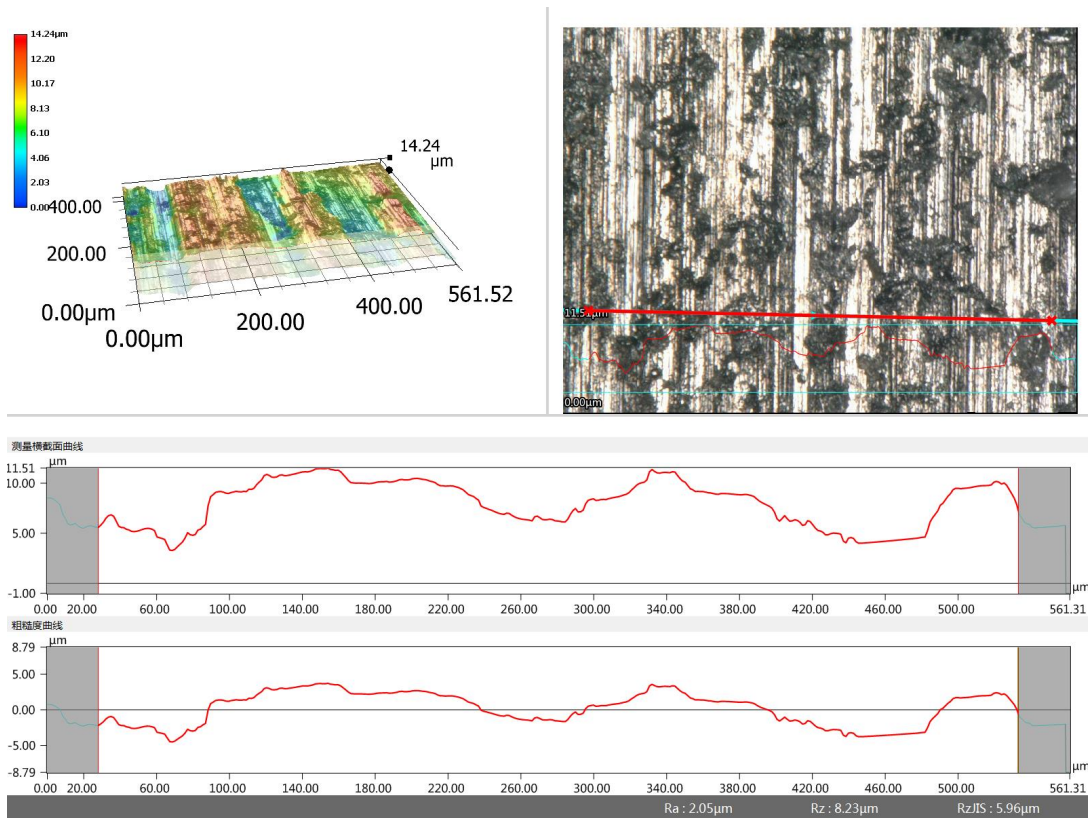


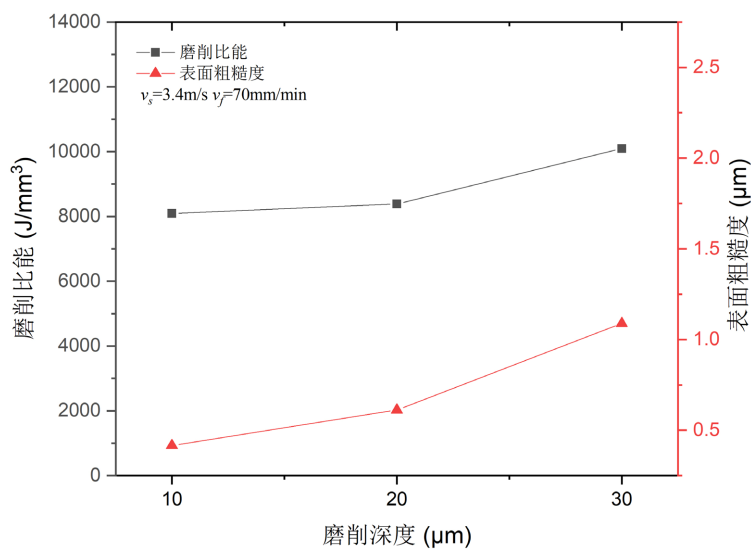
Figure 7. SiCp/Al surface morphology under 3D reconstruction
图 7. 三维重构下的 SiCp/Al 表面形貌

3.3. 磨削参数对磨削能耗的影响

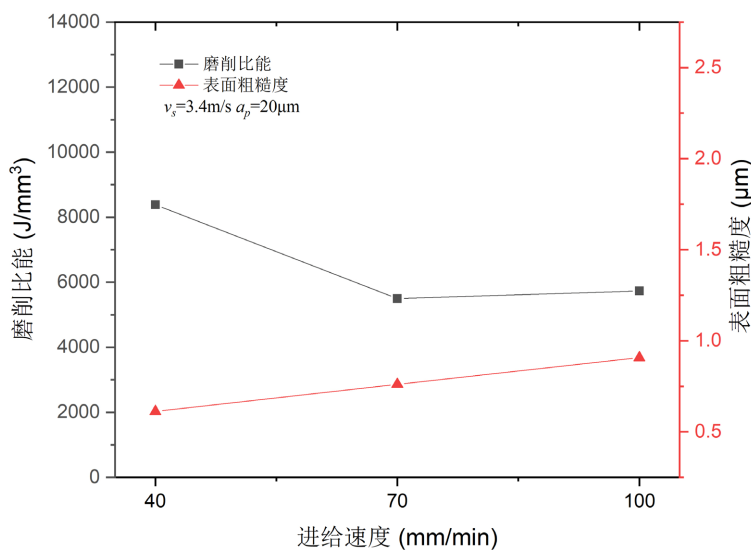
引用传统磨削的比能的经验公式[11]如式(5), 其中 b 为磨粒在工件中的去处宽度, ETG 是磨削过程中单位体积材料去除的能耗。将上文实验所得数据带入公式, 可建立磨削参数与磨削比能与表面粗糙度

的双曲线图如图 8 所示。从图中可得，在相同进给速度和主轴转速下，磨削比能与表面粗糙度随着磨削深度增加而增加(8096.25~10,098 J/mm³)；在以进给速度为变量时，磨削比能与进给速度大体呈反比关系，在 $v_f = 40\sim 70$ mm/min 时磨削比能从 8383.12 J/mm³ 降到了 5493.42 J/mm³，在 $v_f = 70\sim 100$ mm/min 时磨削比能有小幅增加至 5732.4 J/mm³，但表面粗糙度在进给速度的增加下逐步增加；在以主轴转速为变量时，磨削比能与主轴转速为成正比关系，变化范围为(2721.70~6483.33 J/mm³)，粗糙度随着主轴转速的上升而下降。综上，主轴转速的变化对磨削比能的影响最大，其次是进给速度，最后是磨削深度。从绿色制造的角度来看减少磨削深度、主轴转速或增加进给速度可以有效减少磨削过程所需的能耗，更加满足节约能源和绿色制造的要求。结合表面粗糙度来看，使用小磨削深度以及适中的进给速度与主轴转速，可以在获得较优表面粗糙度的同时减少磨削能耗。

$$E_{TG} = \frac{F_t v_s}{a_p b v_f} \tag{5}$$



(a) 改变磨削深度



(b) 改变进给速度

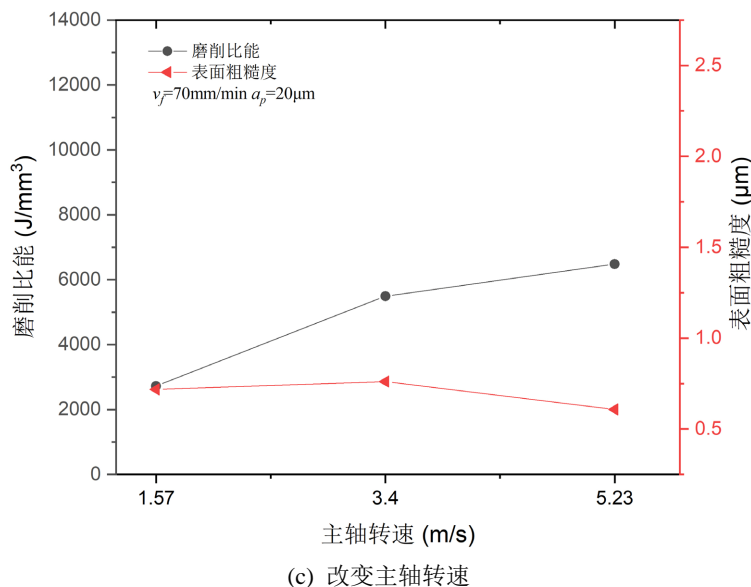


Figure 8. Grinding specific energy obtained by different grinding parameters
图 8. 不同磨削加工参数得到的磨削比能

4. 结论

结合有限元仿真和磨削比能公式, 本研究深入探讨了 SiCp/Al 复合材料(SiC 体积分数为 55%, SiC 颗粒粒径 40~60 μm)在不同磨削参数下的磨削力及其影响因素。仿真结果与实测相符, 表明磨削力随磨削深度和进给速度增加而增加。关键影响因素依次为磨削深度、进给速度, 主轴转速的影响相对较弱。降低磨削深度、主轴转速, 提高进给速度有助于降低表面粗糙度, 提升加工质量。磨削比能的变化主要受主轴转速、进给速度和磨削深度的影响, 从节能绿色制造的角度考虑, 选择适宜参数可有效减少能耗, 同时获得优越表面粗糙度。建议在实际应用中选择小磨削深度、较大主轴转速和适中进给速度, 以在实现高质量表面加工的同时降低能耗, 符合绿色制造要求。

参考文献

- [1] 朱昌隆, 王洪泽, 郭利萍, 等. 铝基复合材料激光粉末床熔化增材制造研究现状[J]. 铸造技术, 2023, 44(7): 583-598.
- [2] Zhou, L., Huang, S.T., Wang, D., et al. (2011) Finite Element and Experimental Studies of the Cutting Process of SiCp/Al Composites with PCD Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **52**, 619-626. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2776-2>
- [3] Gu, P., Zhu, C., Tao, Z., et al. (2020) A Grinding Force Prediction Model for SiCp/Al Composite Based on Single-Abrasive-Grain Grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **109**, 1563-1581. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05638-7>
- [4] 黄斌, 段富海, 袁绪武, 等. SiCp/Al 复合材料复杂曲面的精密加工刀具设计[J]. 机电工程技术, 2018, 47(10): 11-13+115.
- [5] Huang, S. and Yu, X. (2018) A Study of Grinding Forces of SiCp/Al Composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **94**, 3633-3639. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1115-2>
- [6] Wang, T., Xie, L. and Wang, X. (2015) Simulation Study on Defect Formation Mechanism of the Machined Surface in Milling of High Volume Fraction SiCp/Al Composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **79**, 1185-1194. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6876-x>
- [7] Zhang, J., Ouyang, Q., Guo, Q., et al. (2016) 3D Microstructure-Based Finite Element Modeling of Deformation and Fracture of SiCp/Al Composites. *Composites Science and Technology*, **123**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.11.014>

- [8] Liu, J., Cheng, K., Ding, H., *et al.* (2018) Simulation Study of the Influence of Cutting Speed and Tool—Particle Interaction Location on Surface Formation Mechanism in Micromachining SiCp/Al Composites. *Journal of Mechanical Engineering Science*, **232**, 2044-2056. <https://doi.org/10.1177/0954406217713521>
- [9] 张旭, 张红哲, 鲍永杰. 不同体积分数 SiC_p/Al 复合材料单颗磨粒划切仿真与试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(6): 2073-2083.
- [10] Li, G., Zhang, X., Fan, Q., *et al.* (2014) Simulation of Damage and Failure Processes of Interpenetrating SiC/Al Composites Subjected to Dynamic Compressive Loading. *Acta Materialia*, **78**, 190-202. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.06.045>
- [11] Jiang, C., Wu, T., Ye, H., *et al.* (2019) Estimation of Energy and Time Savings in Optical Glass Manufacturing When Using Ultrasonic Vibration—Assisted Grindin. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, **6**, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00022-7>