

# SiCp/Al复合材料磨削去除形式及表面损伤研究

苗龙泉

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年3月21日; 录用日期: 2023年5月22日; 发布日期: 2023年5月29日

## 摘要

目的: 展开SiCp/Al复合材料磨削加工中SiC颗粒去除机理以及磨削加工表面完整性的分析。方法: 设计了材料数值模型与单因素磨削实验, 以J-C本构模型和颗粒断裂准则作为材料损伤依据, 对20%vol SiCp/Al进行切削仿真数值模拟, 从磨削力、材料内部应力变化及分布等研究SiC颗粒与磨粒相对位置对其去除机理的影响, 采用干式逆磨在CarverS600A机床上展开磨削试验, 分析不同工艺参数对表面粗糙度的影响, 分析典型表面缺陷及成因。结果: 磨粒切削SiC颗粒时的磨削力是磨削Al基体的5~7倍, 材料内部应力集中现象多发生于SiC颗粒与Al基体界面, SiC颗粒被切削深度增大, 小尺寸颗粒易发生脱粘去除, 大尺寸颗粒易发生断裂破碎, 当砂轮线速度由4.7 m/s增大到9.4 m/s时, 沿磨削方向表和垂直磨削方向的粗糙度均呈现下降趋势, 当磨削深度由3  $\mu\text{m}$ 增大到12  $\mu\text{m}$ 或工件速度由50 mm/min增大到200 mm/min, 沿磨削方向表和垂直磨削方向的粗糙度均呈现增大趋势。结论: SiC颗粒的去除方式为断裂破碎、脱粘拔出、解离破碎为主, 这是造成表面完整性差的主要原因, 减小磨削深度增大砂轮线速度可显著减少表面缺陷。

## 关键词

SiCp/Al复合材料, 磨削, 去除形式, 粗糙度, 表面缺陷, 数值模拟

# Research on Grinding Removal Form and Surface Damage of SiCp/Al Composites

Longquan Miao

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

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2023; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2023; published: May 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

**Objective:** To develop the analysis of SiC particle removal mechanism and surface integrity of grinding process in SiCp/Al composite materials. **Methods:** A numerical material model and single-factor grinding experiments were designed to simulate the cutting of 20%vol SiCp/Al based on

the J-C intrinsic structure model and the particle fracture criterion. The grinding test was carried out on a CarverS600A machine using dry reverse grinding to analyze the effect of different process parameters on the surface roughness and to analyze the typical surface defects and their causes. Result: The grinding force when the grinding grain cuts SiC particles is 5~7 times of grinding Al substrate, and the material The internal stress concentration phenomenon occurred mostly at the interface between SiC particles and Al substrate, the depth of SiC particles cut increased, the small size particles were easy to be debonded and removed, and the large size particles were easy to be fractured and broken, when the grinding wheel linear speed increased from 4.7 m/s to 9.4 m/s, the roughness along the grinding direction table and vertical grinding direction showed a decreasing trend, when the grinding depth increased from 3  $\mu\text{m}$  to 12  $\mu\text{m}$  or the workpiece speed increased from 50 mm/min to 200 mm/min, the roughness along the grinding direction table and vertical grinding direction showed a decreasing trend. Conclusion: The removal of SiC particles was mainly by fracture crushing, debonding extraction and dissociation crushing, which were the main reasons for the poor surface integrity, and reducing the grinding depth and increasing the grinding wheel linear speed could significantly reduce the surface defects.

## Keywords

SiCp/Al Composites, Grinding, Remove Form, Roughness, Surface Defect, Numerical Simulation

Copyright © 2023 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

SiCp/Al 复合材料是铝合金为基体、SiC 颗粒构成的颗粒增强形复合材料, 同时具备两者优点, 如比强度大、耐磨性好、耐高温等优点, 被广泛应用于汽车、军事、光学精密仪器等领域[1] [2]。然而, 由于 Al 基体和 SiC 颗粒的物理力学特性相差较大, 在机械加工中容易带来切削力不稳定、加工表面完整性差等问题, 从而限制该类材料的广泛应用[3] [4]。

为获取高质量的 SiCp/Al 复合材料加工表面, 大量研究人员通过实验和仿真结合的方式对 SiCp/Al 复合材料展开研究[5]。Teng [6]等比较了不同尺寸级别下的 SiC 颗粒对材料表面质量的影响, 发现纳米级别的 SiC 颗粒可以显著改善表面质量。Gao [7]等研究了高体积分数的 SiCp/Al 复合材料的变形机制和工艺参数对表面粗糙度的影响。Zhang [8]等通过 ABAQUS 模拟不同颗粒尺寸下的切削行为, 分析切削过程中最大等效应力出现位置和颗粒粒度对切屑形态的影响。Duan [9]等考虑了基体粘附、二体磨损和三体滚动摩擦等因素, 指出 SiC 颗粒主要以脱粘、破碎和挤压的方式在剪切区与刀-屑接触部分被去除。Xu [10]等研究发现 SiC 颗粒在小于 0.01  $\mu\text{m}$  的划痕深度下以延性方式去除, 随着划痕深度的增加, SiC 颗粒的脆性断裂变的明显。房玉鑫等[11]研究了高速铣削条件下的成屑机理和表面完整性, 结果表明提高切削速度能够显著提高加工表面质量。在此基础上, 对 SiCp/Al 复合材料表面和亚表面损伤也有相关研究, Wang [12]等通过仿真和车削实验指出切削深度接近颗粒高度一半时, 颗粒完全脱粘, 形成空洞, 导致表面质量恶化, 减小切削深度可提高表面质量。Wang [13]等仿真分析了表面缺陷的形成机制, 发现其与 SiC 颗粒几何尺寸有关; 而 Wu [14]等则通过仿真与实验相结合的方式研究了切削深度对亚表面损伤深度程度的影响。王俊磊[15]、Xiang [16]和 Yan [17]等利用有限元模型探究了超声振动对 SiCp/Al 复合材料加工表面形貌以及表面损伤的影响, 研究表明, 超声振动振幅在一定范围内增大, 可有效改善颗粒破碎效果, 减少亚表面损伤, 抑制表面裂纹扩展等。

SiC 颗粒断裂机制与其形态尺寸有关, 并且其断裂形式对材料表面损伤程度起到关键性作用, 尽管在上述研究中分析了颗粒尺寸与表面缺陷、表面粗糙度的关系, 但是未充分研究不同切割深度下的颗粒断裂形式, 除此之外, 两相界面层属性对复合材料整体性能[18], 如整体刚度、强度和韧性等有着密切联系, 在建立有限元模型时应充分考虑这些因素, 因此本研究在针对上述研究中存在的不足, 建立考虑 SiC 颗粒以及两相界面影响的有限元仿真模型, 对 SiC 颗粒在不同磨削路径的去除形式, 引起的表面缺陷、表面损伤展开仿真分析, 并进行了试验验证。

## 2. SiCp/Al 有限元模型建立

### 2.1. 有限元几何模型

材料与磨粒的几何特征是建立有限元模型的基础, 也是影响分析结果的关键。因此本研究使用 PYTHON 语言对 ABAQUS 进行二次开发, 建立 SiCp/Al 复合材料几何模型, 实现 SiC 颗粒的随机分布, 图 1 显示为磨粒切削几何模型, 图中磨粒设置为刚体, 其中 Referencepoint 为刀具的刚体参考点。工件为长 200  $\mu\text{m}$ , 宽 40  $\mu\text{m}$  的矩形, SiC 颗粒直径为 5~20  $\mu\text{m}$ , 并依据本文所用材料中增强相含量, Al 基体 2A14、SiC 颗粒和金刚石磨粒物理力学性能参数如表 1 所示[19] [20]。基于 SiCp/Al 复合材料主要成分(见表 2), 将 SiC 颗粒体积分数设置为 20% [21] [22]。

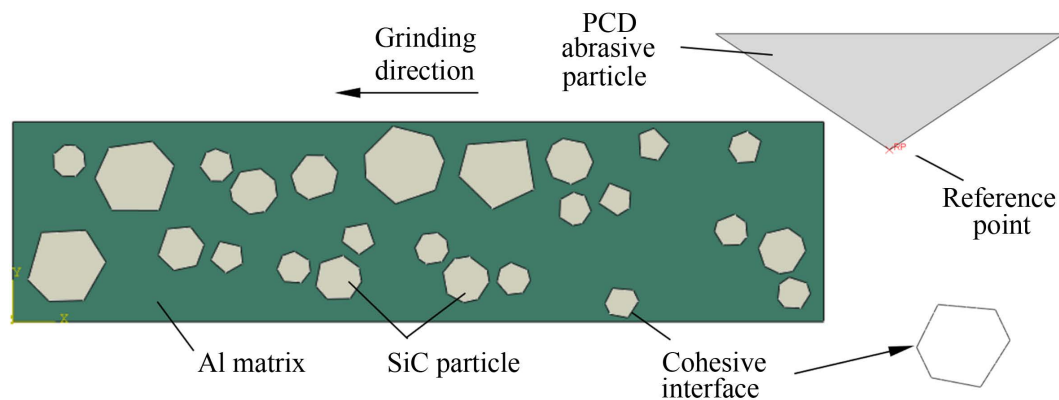


Figure 1. SiCp/Al composites grinding geometric model  
图 1. SiCp/复合材料磨削几何模型

Table 1. Physical property parameters of Al matrix, SiC particles and diamond abrasive particles  
表 1. Al 基体和 SiC 颗粒以及金刚石磨粒物理性能参数

Parameters	2A14	SiC	Diamond abrasive
Density/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$2.70 \times 10^3$	$3.2 \times 10^3$	$3.52 \times 10^3$
Young modulus/GPa	68.9	485	1147
Yield strength/MPa	325	1500	-
Specific heat/( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	900	427	525
Heat conductivity/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	180	81	2100
Thermal expansivity/( $\times 10^{-6}\text{C}$ )	21.8	4.9	4.0
Poisson's ratio	0.31	0.14	0.07

**Table 2.** Proportion of main components of materials (volume fraction)  
**表 2.** 材料主要成分占比(体积分数)

Materials	SiCp	2A14							
		80%							
20% SiCp/Al composites	20%	W <sub>B</sub>							
		Si	Cu	Mn	Mg	Ti	Fe	Zn	Al
		0.6~1.2	3.9~4.8	0.4~1.0	0.4~0.8	<0.15	<0.7	<0.3	bal

## 2.2. 有限元仿真模型

### 2.2.1. 铝基体本构模型

在仿真模拟前处理过程中，基于 Al 基体、SiC 颗粒物理力学性能不同，分别对其进行材料属性的赋予，铝基体以 Johnson-Cook 本构模型[23]，如式(1)所示：

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

式中  $A$ 、 $B$ 、 $c$ 、 $\varepsilon$ 、 $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_p$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $T_m$ 、 $T_r$  分别为材料屈服强度、应变硬化数、应变率数；是等效塑性应变率、参考应变率、等效塑性应变；熔点、室温应变敏感数、热软化数；如表 3 所示：

**Table 3.** Parameters of Johnson-Cook constitutive model for Al matrix  
**表 3.** Al 基体 Johnson-Cook 本构模型参数

A/MPa	B/MPa	$n$	$c$	$m$	$T_r/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$
176.45	63.99	0.07	0.0036	0.31	20	650

Al 合金基体的切屑分离过程由 Johnson-Cook 断裂准则来描述[14]， $D$  的表达式如式(2)： $D = 0$  表示损伤演化起始，当  $D = 1$  表示材料完全失效，表达形式：

$$D = \sum \frac{\Delta \xi^{pl}}{\xi_0^{pl}} \quad (2)$$

式中： $\Delta \xi^{pl}$ 、 $\xi_0^{pl}$  分别为损伤起始的等效塑性应变等效塑性应变增量。

$$\xi_0^{pl} = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \cdot \frac{p}{q} \right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 + d_5 \left( \frac{T - T_0}{T_{MELT} - T_0} \right) \right] \quad (3)$$

式中：断裂失效参数  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$  的数值如表 4 所示。

**Table 4.** Failure parameters of Johnson-Cook fracture in Al matrix  
**表 4.** Al 基体 Johnson-Cook 断裂失效参数

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

### 2.2.2. SiC 颗粒断裂准则

SiC 作为一种硬脆材料，在切削过程中会直接发生脆性失效，因此材料断裂准则设置为脆性断裂准则。SiC 颗粒的失效用正应力准则描述[24] [25]，其定义为

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_0 \quad (4)$$

式中： $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 为应力主分量， $\sigma_0$ 为脆性材料的抗拉强度。

SiC 颗粒达到失效阈值后，其损伤演化判定准则为断裂能准则。为损伤裂纹的开裂位移，被计算为：

$$u_{n0} = 2G_f^I / \sigma_{tu}^I \quad (5)$$

剪应力保留模型是剪应力对 SiC 颗粒裂纹应变的函数，可以通过式(6)计算：

$$G_c = \rho(e_{nn}^{ck}) G \quad (6)$$

式中： $G_c$ 为材料未失效时剪切模量， $\rho(e_{nn}^{ck})$ 为 $e_{nn}^{ck}$ 的剪切保持函数：

$$\rho(e_{nn}^{ck}) = \left(1 - \frac{e_{nn}^{ck}}{e_{nn}^{ck_{max}}}\right)^p \quad (7)$$

式中： $p$ 、 $e_{nn}^{ck_{max}}$ 为材料相关参数， $e_{nn}^{ck}$ 为开裂张开应变。

在有限元建模中，描述 SiC 脆性断裂参数如表 5 所示。

**Table 5.** Parameters of SiC particle brittle fracture model

**表 5.** SiC 颗粒脆性断裂模型参数

$\sigma_{tu}^I$ /MPa	$G_f^I$ /(J/m <sup>2</sup> )	$p$	$u_{n0}$ /m
1500	30	1	0.003

### 2.2.3. 基体 - 颗粒内聚力界面模型

在 SiCp/Al 数值模拟处理过程中，粘聚力单元被广泛应用于描述基体 - 颗粒界面上力与裂纹位移的作用关系上。在外力作用下，基体 - 颗粒界面承受载荷，Al 基体与 SiC 颗粒在两相界面处开始分离，依据界面断裂破坏准则，在裂纹位移达到预设值时，粘聚力单元失效，裂纹沿粘聚力边界拓展，进一步导致两相界面失效，从而使 Al 基体与 SiC 颗粒分离脱粘[26]。研究使用内聚力单元建立界面模型为：

$$T_n = \frac{\sigma_{max}}{S_{init}} \frac{S}{1-S} \frac{\delta_n}{\delta_{nmax}} \quad (8)$$

$$T_t = \zeta \frac{\tau_{max}}{S_{init}} \frac{S}{1-S} \frac{\delta_t}{\delta_{tmax}} \quad (9)$$

在本研究中， $S_{init} = 1$ ，完全失效值： $S_{failure} = 0$ ，粘聚力在载荷作用过程中的变化可由式(10)描述

$$S = 1 - \sqrt{\left(\frac{\delta_n}{\delta_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_t}{\delta_{t\max}}\right)^2} \quad (10)$$

两相界面的损伤破坏基于二次名义应力准则，即当切向名义应力比和法向名义应力比的平方等于 1，Al 基体-SiC 颗粒界面开始损伤，描述公式如式(11)，取值如表 6 所示。

$$\left(\frac{T_n}{\sigma_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{T_t}{\tau_{\max}}\right)^2 = 1 \quad (11)$$

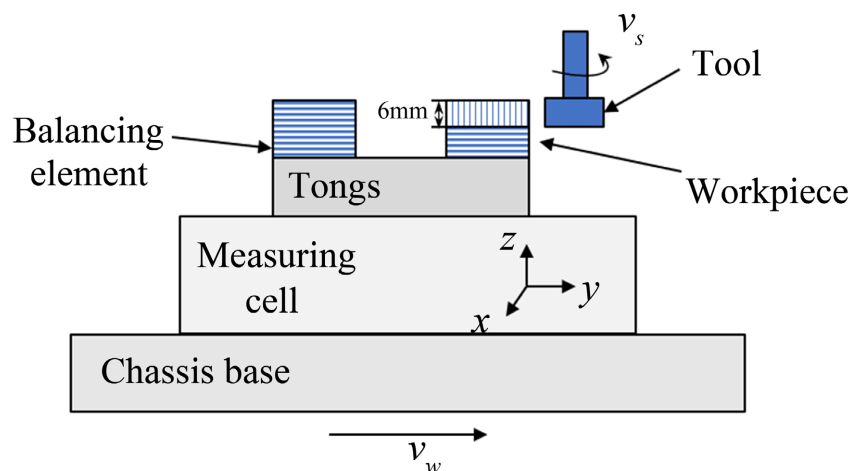
**Table 6.** Cohesion parameters

**表 6.** 内聚力参数

$\sigma_{\max}$ /MPa	$\tau_{\max}$ /MPa	$\delta_t$ /mm	$\delta_n$ /mm
400	400	0.0025	0.0025

### 3. 加工试验条件与方法

在本研究中，工件材料使用 20%Vol SiCp/Al 复合材料，经线切割加工材料至尺寸为：长\*宽\*高 = 20 mm\*20 mm\*5 mm 的式样，磨削实验在 Carver S600A 机床上进行，式样经 PCD 精铣后进行平面磨削试验。在磨削条件上，湿式磨削时，磨削液能加快磨屑的排出，减小磨屑对已加工表面质量划伤，但磨削液难以进入磨削区，加工时磨削区温度高，在砂轮磨削过后，磨削液会使工件表层温度急剧下降，以至工件表层产生较大的应力，可能导致表面坑洞、裂纹等缺陷。采用干式磨削时，磨削区高温使铝基体软化，使其硬度降低，从而材料表面整体的硬度会相应降低，表层塑性流动加强，弥合加工表面微观裂纹，减少应力集中。在磨削方式上，当采用顺磨时，由于工件和砂轮在磨削区运动方向相同，SiC 颗粒的损伤比较单一，尽管表面粗糙度较好，但同时也无法准确分析 SiC 颗粒的各类损伤形式，当采用逆磨时，SiC 颗粒的损伤形态较多，因而也能够更加直观地分析 SiC 颗粒的损伤情况，因此本研究选用干式逆磨方式进行加工，如图 2 所示。磨削刀具采用上海蓝领数控科技的金刚石树脂结合剂铣磨刀具，磨削加工现场如图 3 所示，磨削后的工件采用通过超声清洗机去除表面磨屑及杂质。磨削试验参数如表 7 所示。



**Figure 2.** Processing diagram

**图 2.** 加工示意图





Figure 3. Test equipment and site settings  
图 3. 试验设备及现场设置

Table 7. Grinding process parameters table  
表 7. 磨削工艺参数表

Grinding speed/(m/s)	Work speed/(mm/min)	Grinding depth/ $\mu\text{m}$
4.7、6.2、7.6、9.4	50、100、150、200	3、6、9、12

磨削表面观测试验是通过白光干涉仪与 ZEISS Gemini 300 SEM 扫描电镜相结合的方式，并以此分析表面的主要缺陷形式，展开对磨削表面形貌和粗糙度的分析与研究，观测试验中的粗糙度采集方式是通过随机选取磨削表面上三个位置，取粗糙度数值的平均值，作为其表面粗糙度，利用单因素试验分析磨削速度、进给速度、磨削深度对表面粗糙度粗糙度的影响。

## 4. 结果分析与讨论

### 4.1. SiC 颗粒断裂机理分析

SiCp/Al 复合材料微观去除过程受到 SiC 颗粒与磨粒的相对位置的影响，为解释 SiCp/Al 复合材料在加工过程中的去除机理，进行了不同切割深度下的材料去除仿真分析，细微观中磨粒与 SiC 颗粒接触方式如图 4 所示，图 5 中显示了本此模拟中形态各异的 SiC 颗粒位于磨粒不同切割路径下的相互作用位置，由于颗粒 SiC 颗粒属于高硬脆性材料，相较于 Al 基体在加工中与磨粒在不同的接触位置会产生不同的应力状态，从而产生不同的去除形式，这对工件表面完整性起重要作用。

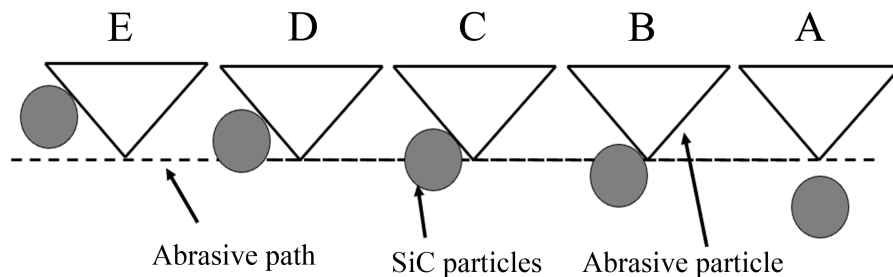


Figure 4. Location diagram of abrasive particles and particles  
图 4. 磨粒与颗粒位置示意图

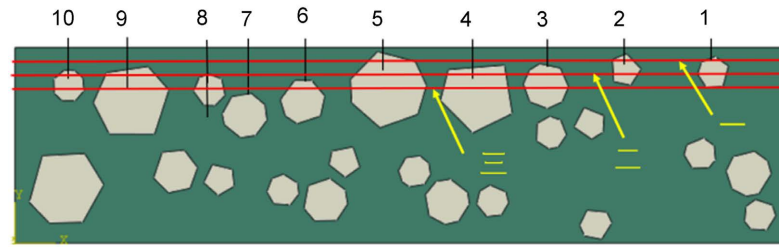


Figure 5. Trajectory of abrasive particles  
图 5. 磨粒轨迹图

图 5 中标记为“—”的直线表示为磨粒作用深度在  $3\ \mu\text{m}$  的磨粒轨迹图，此时，颗粒 1、颗粒 2、颗粒 5 在磨粒运动路径上，图 6(a)为磨粒切削后的表面形貌图，从图中能明显看出，只有 SiC 处发生了较大的脆性去除，在磨粒切削过程中，SiC 颗粒是承受载荷的作用主要，在此相对位置下，SiC 颗粒发生顶部局部断裂，造成表面小凹坑。图 6(b)左图显示的是在此切割深度下的切向力与法向力的变化趋势，右图显示颗粒去除过程的 Von mises 应力分布，当磨粒分别与 Al 基体和 SiC 颗粒作用时，切削 Al 基体时的作用力都明显小于 SiC 的作用力，经计算，SiC 颗粒的磨削力是 Al 基体的 5~7 倍，在磨粒接近 SiC 颗粒时，由于 SiC 颗粒形态以及力学性质明显区别于 Al 基体，在 SiC 颗粒与 Al 基体界面发生应力集中现象，因此切削力也迅速增大，当磨粒与 SiC 发生接触时，切削力达到峰值，此时 SiC 颗粒内部应力达到其强度，导致发生 SiC 颗粒断裂破坏，当 SiC 发生断裂或者磨粒切出 SiC 颗粒时，切削力急剧下降。颗粒断裂过程的磨粒切削力及内部应力变化对应如图 6(b)中 A、B、C、D 所示。

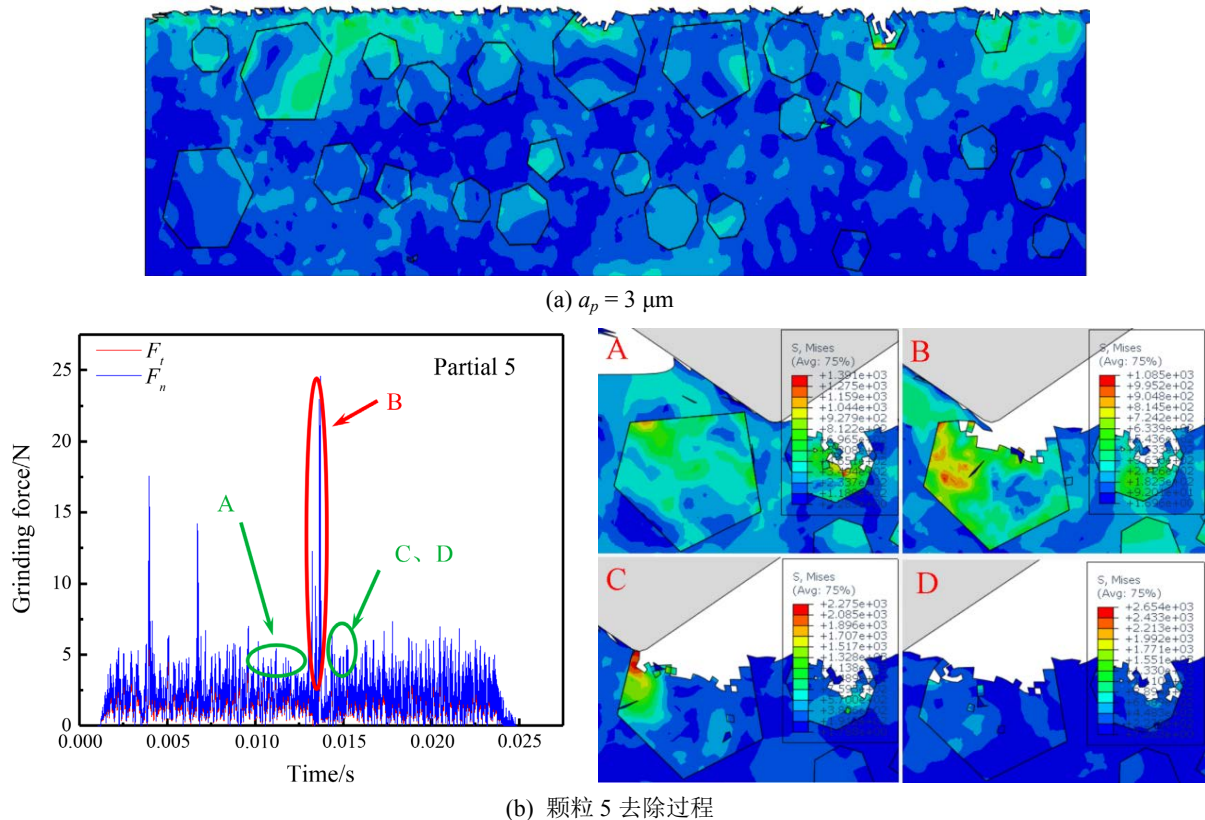


Figure 6. Surface morphology and removal phenomenon  
图 6. 表面形貌与去除现象



实际磨削过程中，由于 SiC 颗粒分布随机性以及磨粒的反复切削下，稳定磨削阶段，磨削力的变化时会在一定范围内波动，但是无论是切削 Al 基体还是 SiC 颗粒其切向力都小于法向力，如图 7 所示，图中因测力仪安装方向及设置原因， $F_x$  为实际磨削中的法向力， $F_y$  为实际磨削中的切向力。

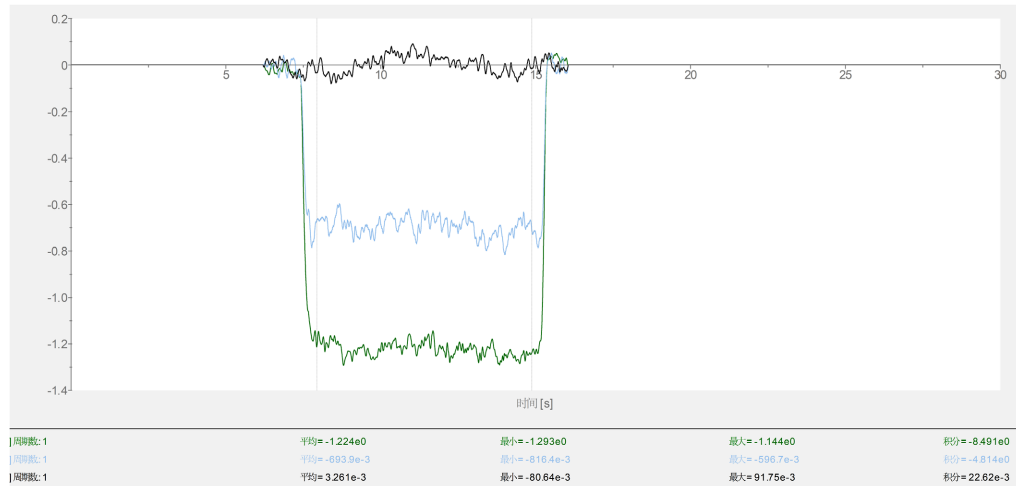


Figure 7. Change of grinding force

图 7. 磨削力的变化

图 5 中标记为“二”的直线表示为磨粒切割深度在  $6\ \mu\text{m}$  的磨粒切削轨迹图，此时，在 SiC 颗粒 1~10 中，只有颗粒 7 未参与切削，随着磨粒切割深度增加到  $9\ \mu\text{m}$  时，颗粒 7 也参与了切削，随着磨粒切深由  $3\ \mu\text{m}$  增加到  $6\ \mu\text{m}$  时，SiC 颗粒发生断裂的现象增多，并且小尺寸颗粒发生了解离去除，大尺寸颗粒的损伤深度增大，磨粒切削表面形貌图如图 8(a) 所示。图 5 中标记为“三”的直线表示为磨粒切割深度在  $9\ \mu\text{m}$  的磨粒切削轨迹图，图 8(b) 显示了在磨粒切割深度为  $9\ \mu\text{m}$  下的表面形貌，相较于切割深度  $3\ \mu\text{m}$  和  $6\ \mu\text{m}$  的表面形貌，在  $9\ \mu\text{m}$  下的磨削表面存在更多缺陷，小尺寸颗粒被拔出形成凹坑，大尺寸颗粒产生的裂纹也随着增大。

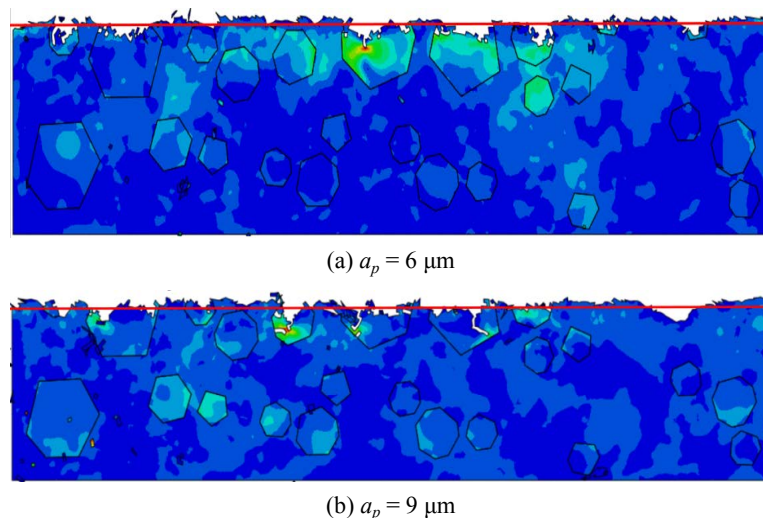


Figure 8. Surface topography of abrasive cutting

图 8. 磨粒切削表面形貌

伴随着 SiC 颗粒相对于路径的上移，颗粒的损伤形式发生了转变，如图 9，颗粒 1 在  $9\ \mu\text{m}$  下发生整

体颗粒破碎，并有残留的破碎颗粒，当磨粒切削至颗粒 1 下部时，发生了脱粘拔出，并且颗粒底部的基体发生了撕裂，图 10 中显示颗粒 5 随着磨粒切削深度的增加的应力变化，仿真显示去除方式也由局部破碎转为解离破碎，并伴有微裂纹的产生。值得注意的是，内部应力的大小与其在路径的不同位置有关，且应力集中均从 Al 基体与 SiC 接触界面发生，随着 SiC 被切削深度的增大，其承受的载荷也随之增大。在参与磨粒切削的 SiC 颗粒中，SiC 颗粒去除方式也并非完全相同，如颗粒 3，在磨粒切深  $6\ \mu\text{m}$  下发生断裂破碎，在磨粒切深  $9\ \mu\text{m}$  下发生塑性去除，而随着磨粒切削深度的增大，与之类似形态尺寸的颗粒 10 却由整体断裂破碎转变为脱粘拔出。以上分析表明，尺寸较小的 SiC 颗粒去除方式随着被切削深度的增大易发生脱粘去除，但也受到 SiC 颗粒在 Al 基体中位置状态的影响，发生塑性去除。较大尺寸的 SiC 颗粒去除方式以断裂破碎为主，随着被切削深度的增大会伴有裂纹产生。

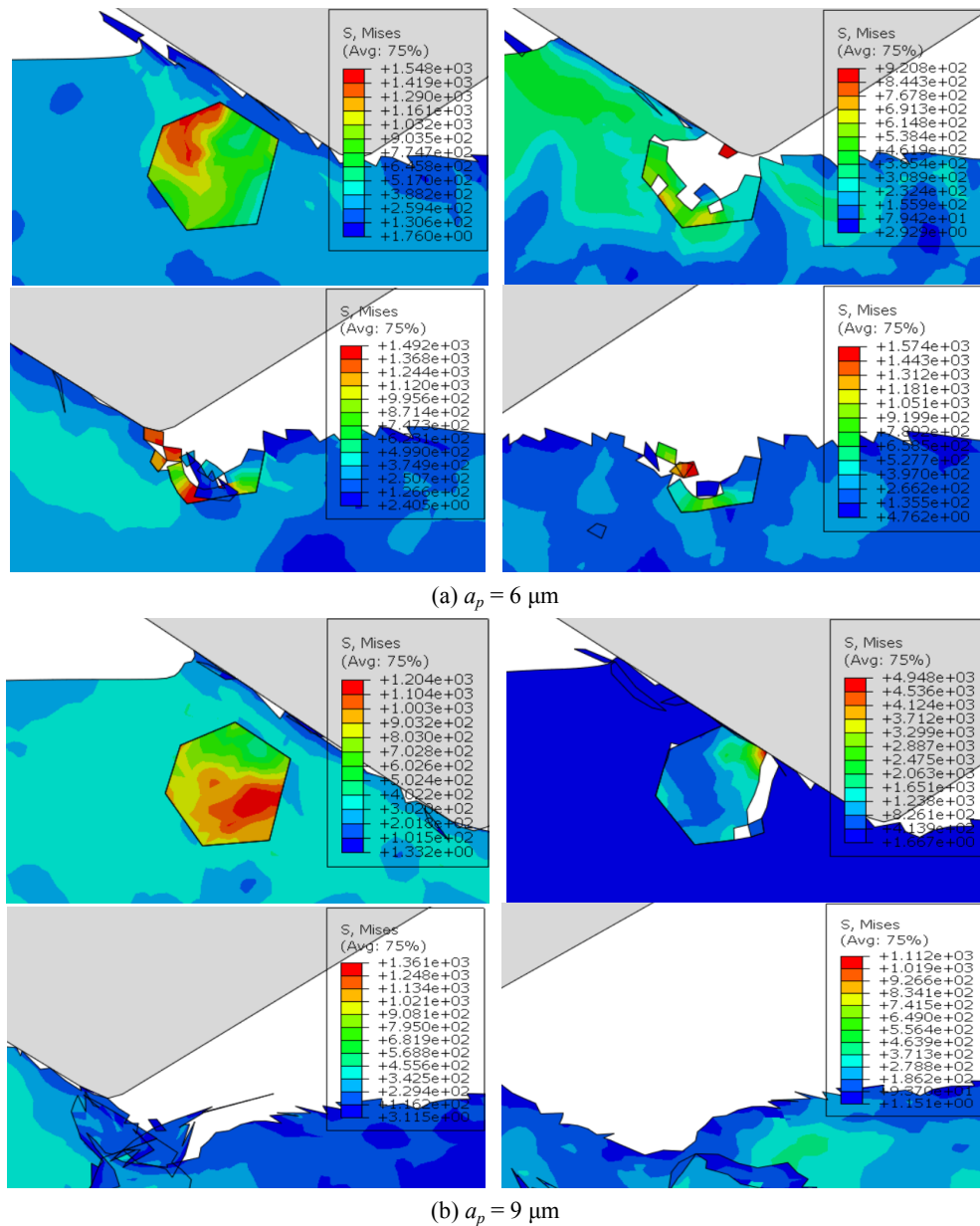
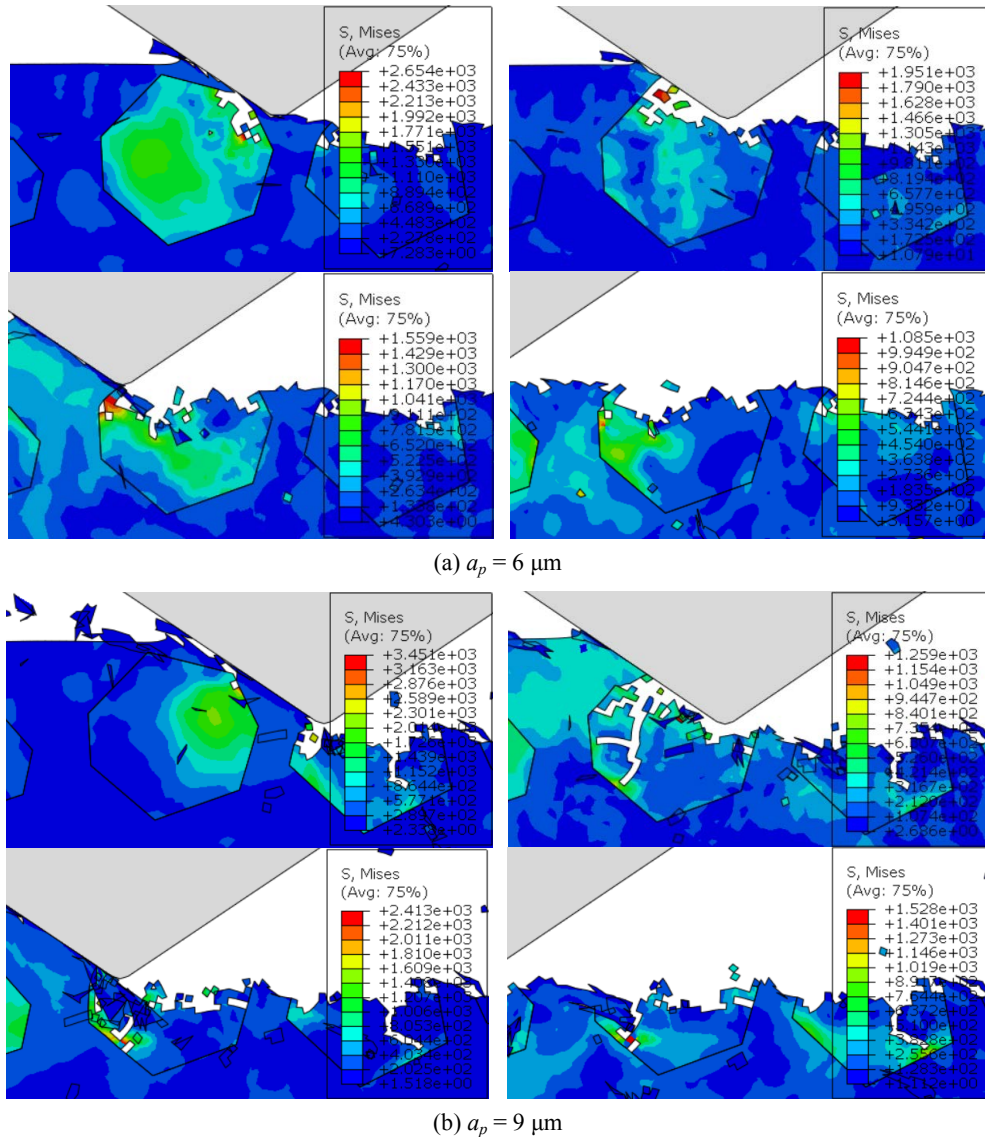


Figure 9. Debonding process of particle 1  
图 9. 颗粒 1 脱粘过程



**Figure 10.** Fracture process of particle 5  
**图 10.** 颗粒 5 断裂过程

## 4.2. 磨削加工表面完整性分析

为了更加直观地分析 SiCp/Al 复合材料磨削后的表面形貌, 利用白光干涉仪对加工表面进行三维采集, 如图 11 所示。图 11 分别显示在四组磨削深度下的工件的表面形貌, 可以清晰的看出, 随着磨削深度的增加, 磨削沟槽呈现高低交替周期性的变换, 磨削加工表面的高低起伏特征相较于小磨削深度下也更为明显, 因而加工表面的粗糙度也更大。

图 12(a)显示磨削深度对沿磨削方向粗糙度的影响规律, 根据图中曲线变化规律可知, 磨削深度由  $3 \mu\text{m}$  增加到  $12 \mu\text{m}$  时, 加工表面粗糙度明显增大, 主要归因于过大的磨削深度会造成磨削加工过程不平稳, 磨削力和磨削温度增大, 磨粒磨损加剧, 此外, 细微观上磨粒未变形厚度也因此增大, 相应造成 Al 基体塑性变形程度增大, 从而造成 SiCp/Al 复合材料中的 SiC 颗粒脆性去除率增大, SiC 颗粒以脱粘拔出、断裂破碎的形式去除的比例大幅增加, 使得表面粗糙度值在一定范围内大幅度增加, 由图 12(b)可以看出, 磨削速度

由 4.7 m/s 增大到 9.4 m/s 时, 磨削表面粗糙度显著降低, 这归因于实际参与进行磨削过程的磨粒数量增多, 一方面, 砂轮单位时间内转速提高, 提高使得单颗磨粒去除材料量减少, 提高了表面质量。另一方面, 单颗磨粒作用于工件的时间变短, 导致磨削区内产生的热量在砂轮磨削瞬间内无法散出, 材料软化, 因而更易于加工, 在磨粒的反复作用下, 加工表面趋于平整, 进而会降低表面粗糙度, 由图 12(c)可以看出, 当工件速度增大, SiCp/Al 复合材料的加工表面粗糙度随之增大, 这是由于 SiC 颗粒的去除形式发生变化, SiC 颗粒解离破碎、脱粘情况增多, 加工振动变化大, 表面粗糙度也因此而增大。

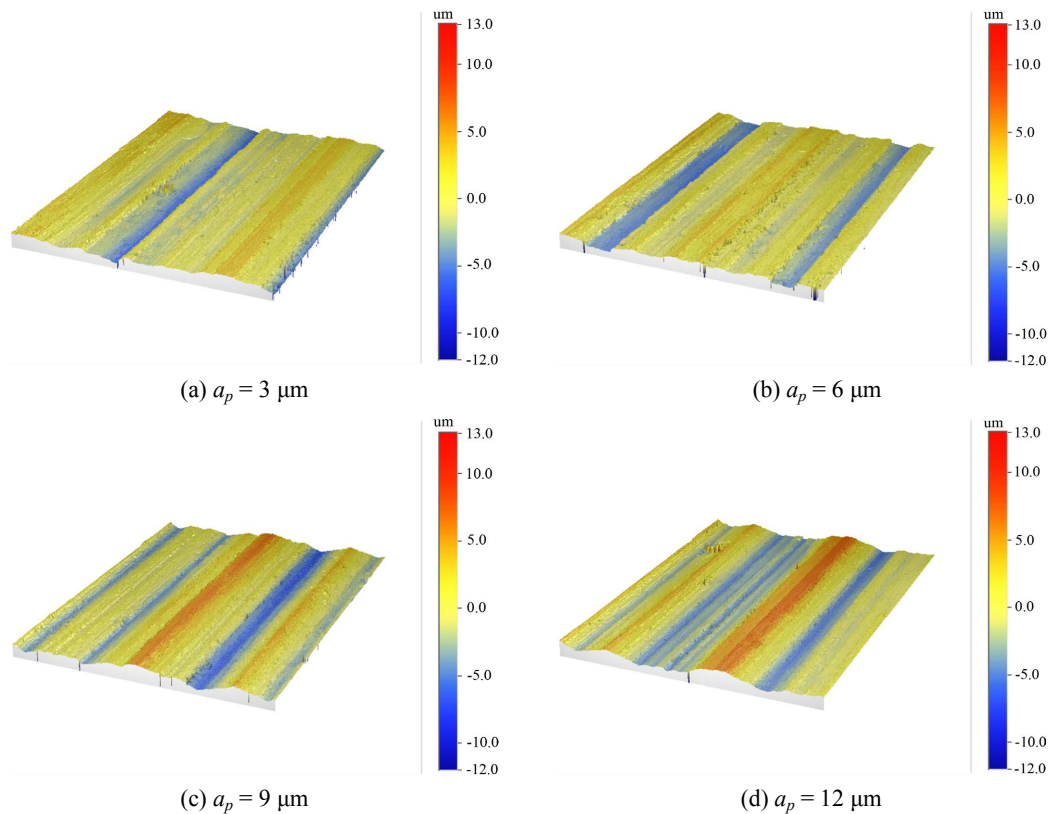
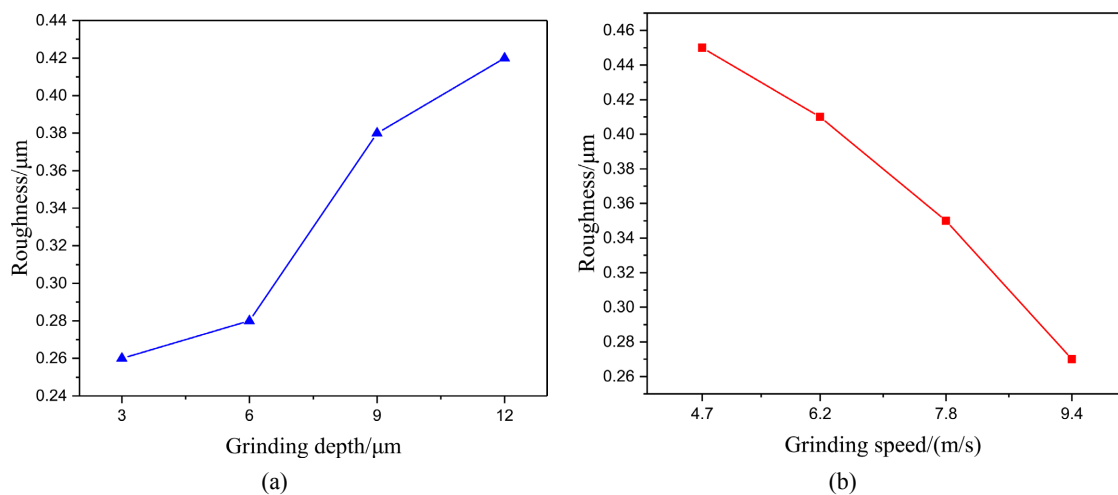
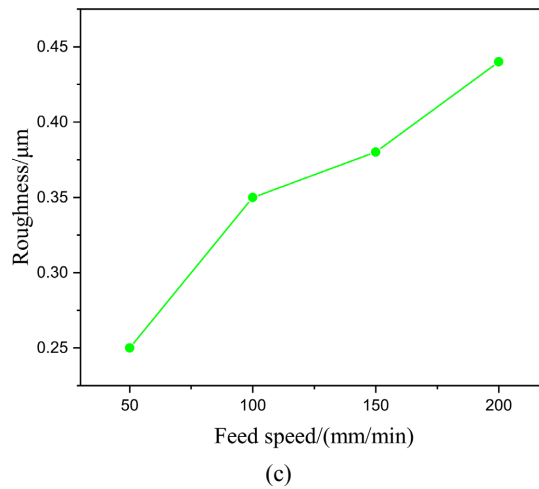


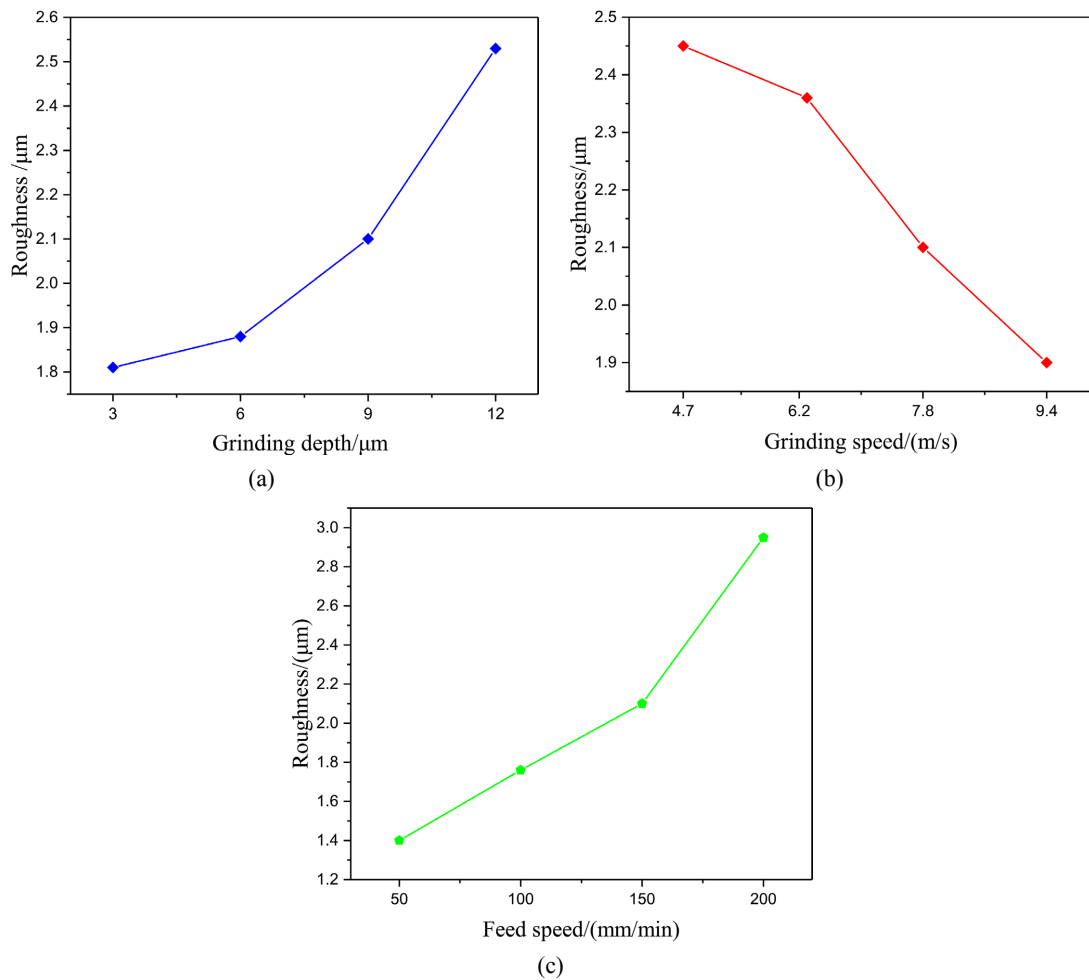
Figure 11. Surface topography of grinding  
图 11. 磨削表面形貌图





**Figure 12.** Variation trend of surface roughness parallel to grinding direction  
**图 12.** 平行磨削方向表面粗糙度变化趋势

图 13(a)~(c)表示为各工艺参数对垂直磨削方向的表面粗糙度的影响,整体上其值的大小显著大于沿磨削



**Figure 13.** Variation trend of surface roughness in vertical grinding direction  
**图 13.** 垂直磨削方向表面粗糙度变化趋势



方向粗糙度数值,一方面受到磨粒出刃高度不同的影响,在磨削过程中造成加工表面沟槽多,导致垂直磨削方向时粗糙度增大。另一方面, SiC 颗粒的去除形式同样对垂直磨削方向的粗糙度造成显著影响。图 13(a)中相较于磨削深度由  $3\ \mu\text{m}$  增大到  $9\ \mu\text{m}$  时粗糙度的变化,磨削深度由  $9\ \mu\text{m}$  增大到  $12\ \mu\text{m}$  时,变化较快,这是受到磨粒出刃高度不同的影响较大,同时较大的磨削深度, SiC 颗粒脱粘、断裂形式比例增大。图 13(b)显示随磨削速度的增大,垂直磨削方向的粗糙度呈下降趋势,产生这种现象的原因与图 12(b)相同,主要是参与切削的磨粒数增多,同时单位时间内产生的热量增大,造成 Al 基体的涂覆现象平整了表面,表面粗糙度降低。图 13(c)为进给速度对垂直磨削方向粗糙度的影响,增大工件进给速度, SiC 颗粒受到磨粒的冲击作用加强, SiC 颗粒的去除方式发生转变,同时逆磨的方式加强了这种作用,使其增大。

图 14(a)~(d) SEM 显示的是 SiCp/Al 复合材料经过磨削后的细微观表面形貌,根据图中观察, SiCp/Al 复合材料加工表面质量较差,表面缺陷以 SiC 颗粒断裂残存在表面、SiC 颗粒脱离基体造成的大空洞、SiC 颗粒解离破碎以及 Al 基体涂敷于凹坑之上等。在磨削过程中,随着砂轮切削运动,当磨粒与塑性 Al 基体接触即在加工表面留下沟槽,当磨粒与脆性 SiC 颗粒接触时,在磨粒的冲击作用下,造成 SiC 破碎,部分脆性断裂的 SiC 颗粒被砂轮以磨屑形式带走,而留下凹坑并残留在 SiC 颗粒破碎形成的小凹坑上,如图 14(a),图 14(c),与周围 Al 基体表面形成鲜明对比,甚至在磨粒的冲击下, SiC 颗粒会脱粘拔出使表面形成大空洞,使得加工表面质量更差,如图 14(b)同时,在磨粒切削过程中,被去除的塑性 Al 基体在高温下部分被粘附在加工表面上或者涂敷于 SiC 颗粒脱粘形成的小凹坑上,这主要是由于在干式

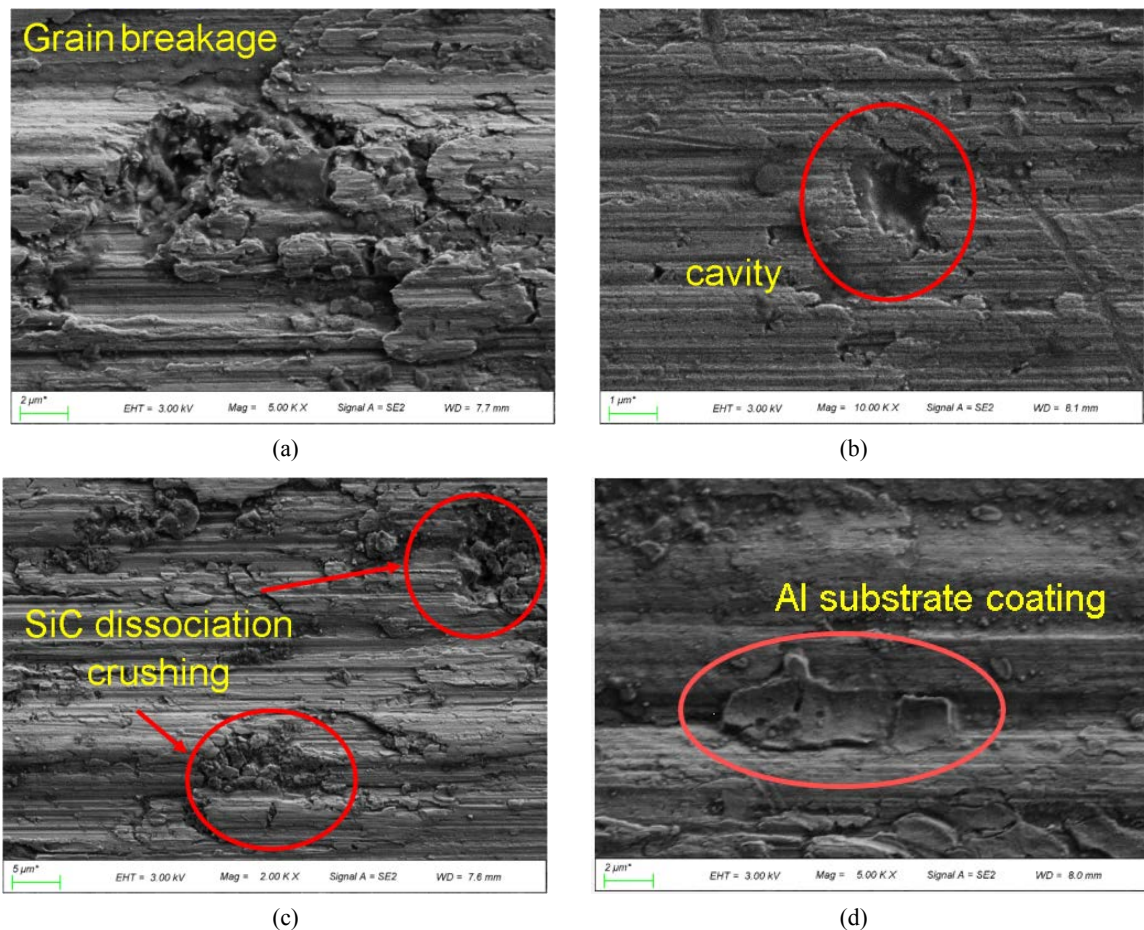


Figure 14. SEM topography of grinding surface  
图 14. 磨削加工表面 SEM 形貌图

磨削条件下, 磨削热聚集在磨削区造成温升较大, 当达到 Al 基体熔点时, 在砂轮与材料的相互挤压下, Al 基体被涂覆在加工表面沟槽上或者 SiC 脱粘形成的凹坑之上, 如图 14(d)。通过具体分析 SiCp/Al 复合材料典型磨削表面形貌特征及其形成机制, 验证了仿真结果, 仿真分析对实际加工有一定的指导意义。

## 5. 结论

本文对 SiCp/Al 复合材料细微观磨削去除过程展开了材料去除仿真研究, 揭示了 SiCp/Al 复合材料去除机理, 揭示了 SiCp/Al 复合材料在磨削加工过程中 SiC 颗粒的断裂机制与被切削深度的大小有关, 得出主要结论如下:

1) 通过磨粒切削模拟仿真可知, 在磨粒切削过程中, 磨粒切削 SiC 颗粒时的磨削力远大与磨削 Al 基体, SiC 颗粒是主要的载荷承受者, 当磨粒接近 SiC 颗粒时, 会在 SiC 颗粒与基体界面处发生应力集中, 颗粒内部应力大小与分布受到 SiC 颗粒尺寸、形状的影响。

2) 在磨削加工过程中 SiC 颗粒的断裂形式发生转变, 增大被切削深度, 较大尺寸颗粒易发生断裂破碎伴有裂纹的产生, 小尺寸颗粒由断裂破碎转为脱粘去除, 并撕裂 SiC 颗粒周围 Al 基体。表面缺陷主要为 Al 基体涂覆、断裂破坏破碎、解离破碎等。

3) 分析了沿磨削方向和垂直磨削方向粗糙度的变化机制, 砂轮速度增大, SiC 颗粒去除发生局部破碎, 表面粗糙度值显著减小, 表面缺陷减少, 增大工件速度或者增大磨削深度, SiC 颗粒脱粘形成大空洞, 表面粗糙度值在一定范围内会显著增大, 表面缺陷增多。

## 参考文献

- [1] Du, J.G., *et al.* (2018) Simulation and Experimental Study on Surface Formation Mechanism in Machining of SiCp/Al Composites. *Applied Composite Materials*, **26**, 29-40. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9681-5>
- [2] 赵旭, 巩亚东, 张伟健. 基于综合评价的 SiCp/Al 磨削表面质量试验[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 329-339.
- [3] 高奇, 荆小飞, 李文博, 等. 高体分 SiCp/Al 复合材料薄壁小孔钻削工艺机理与实验研究[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 202-211.
- [4] Ding, W.F., *et al.* (2019) Research Status and Future Development of Grinding Technology of Titanium Materials for Aero-Engines. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, **40**, Article ID: 022763.
- [5] Hasan, M., Zhao, J.W. and Jiang, Z.Y. (2019) Micromanufacturing of Composite 604 Materials: A Review. *International Journal of Extreme Manufacturing*, **1**, Article ID: 012004. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab0f74>
- [6] Teng X, Chen W, Huo D, *et al.* (2018) Comparison of Cutting Mechanism When Machining Micro- and Nano-Particles Reinforced SiC/Al Metal Matrix Composites. *Composite Structures*, **203**, 636-647. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.076>
- [7] Gao, Q., Guo, G. and Wang, Q. (2021) Study on Micro-Grinding Mechanism and Surface Quality of High-Volume Fraction SiCp/Al Composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **35**, 2885-2894. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0612-2>
- [8] Zhang, P., Yue, X., Zhang, Q., *et al.* (2021) Investigation on the Influence of SiC Particle Parameters on the Machinability of SiCp/Al Composite. *Vacuum*, **191**, Article ID: 110340. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110340>
- [9] Duan, C.Z., Sun, W., Fu, C., *et al.* (2018) Modeling and Simulation of Tool-Chip Interface Friction in Cutting Al/SiCp Composites Based on a Three-Phase Friction Model. *International Journal of Mechanical Sciences*, **142-143**, 384-396. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.05.014>
- [10] Xu, Z., Ya, D.G., Ming, C., *et al.* (2020) Numerical and Experimental Analysis of Material Removal and Surface Defect Mechanism in Scratch Tests of High-Volume Fraction SiCp/Al Composites. *Materials*, **13**, Article No. 796. <https://doi.org/10.3390/ma13030796>
- [11] 房玉鑫, 王优强, 张平. SiCp/Al 复合材料高速切削去除机理及表面质量研究[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 293-300.
- [12] Wang, Y.F., Liao, W.H., Yang, K., *et al.* (2019) Simulation and Experimental Investigation on the Cutting Mechanism and Surface Generation in Machining SiCp/Al MMCs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **100**, 1393-1404. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2769-0>

- [13] Wang, Y., Liao, W., Yang, K., *et al.* (2019) Investigation on Cutting Mechanism of SiCp/Al Composites in Precision Turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **100**, 963-972.
- [14] Wu, Q., Xu, W. and Zhang, L.C. (2019) Machining of Particulate-Reinforced Metal Matrix Composites: An Investigation into the Chip Formation and Subsurface Damage. *Journal of Materials Processing Technology*, **274**, Article ID: 116315. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116315>
- [15] 王俊磊, 袁松梅, 李麒麟, 等. SiCp/Al 超声椭圆振动车削力热特性仿真研究[J/OL]. 航空制造技术, 2022: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4387.V.20211029.0933.002.html>, 2022-06-16.
- [16] Xiang, D., Shi, Z., Feng, H., *et al.* (2019) Finite Element Analysis of Ultrasonic Assisted Milling of SiCp/Al Composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **105**, 3477-3488. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04542-z>
- [17] Yan, Q.L., Dao, H.X., Haoren, F., *et al.* (2020) Surface Characteristics Investigation of Ultrasonic Longitudinal-Torsional Milling of High-Volume Fraction SiCp/Al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **110**, 2119-2130. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05971-x>
- [18] 刘伟. 基于内聚力模型的界面破坏分析[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(S2): 456-460.
- [19] Lu, S., Li, Z., Zhang, J., *et al.* (2020) Finite Element Investigation of the Influence of SiC Particle Distribution on Diamond Cutting of SiCp/Al Composites. *Nanomanufacturing and Metrology*, **3**, 251-259. <https://doi.org/10.1007/s41871-020-00074-3>
- [20] Fan, Y.H., Xu, Y.S., Hao, Z.P., *et al.* (2022) Cutting Deformation Mechanism of SiCp/Al Composites Based on Strain Gradient Theory. *Journal of Materials Processing Technology*, **299**, Article ID: 117345. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117345>
- [21] 费良军, 朱秀荣, 徐永东, 王荣, 沈建明. 搅熔复合-挤压铸造法制备 SiCp/2A14 复合材料[J]. 特种铸造及有色合金, 2007(S1): 277-279.
- [22] Wang, B., Yi, Y., He, H., *et al.* (2021) Effects of Deformation Temperature on Second-Phase Particles and Mechanical Properties of Multi-Directionally-Forged 2A14 Aluminum Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **871**, Article ID: 159459. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159459>
- [23] Laghari, R.A., Li, J.G. and Wu, Y. (2020) Study of Machining Process of SiCp/Al Particle Reinforced Metal Matrix Composite Using Finite Element Analysis and Experimental Verification. *Materials*, **13**, Article No. 5524. <https://doi.org/10.3390/ma13235524>
- [24] 武永祥. SiCp/Al 复合材料切削仿真研究与实验验证[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [25] 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 & Technology*, **123**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.11.014>
- [26] 王涛. 高体积分数 SiCp/Al 复合材料高速铣削基础研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015.