

碳化硅磨削损伤实验研究

牛子晨¹, 安正东²

¹徐州美驰车桥有限公司, 江苏 徐州

²合肥比亚迪汽车有限公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年12月26日; 录用日期: 2026年1月19日; 发布日期: 2026年1月27日

摘要

目的: 为实现碳化硅陶瓷的高质量、低损伤磨削加工, 本研究采用金刚石砂轮开展磨削实验。基于实际砂轮形貌特征, 建立了砂轮磨粒运动轨迹模型以及未变形最大切屑厚度模型, 系统分析了磨削过程中表面形貌、磨削力和亚表面损伤的变化规律。结合有限元仿真, 进一步探讨了磨粒未变形最大切屑厚度对碳化硅陶瓷表面成型机制的影响。结果表明: 随着砂轮进给速度、转速和磨削深度的增加, 磨粒运动轨迹趋于交错密集。在此过程中, 磨削表面沟槽残余最大高度显著降低, 最大降幅从13.11 μm 减小至4.85 μm ; 表面粗糙度也随之降低, 最低达到 $R_a = 1.362 \mu\text{m}$ 。亚表面损伤深度与切屑厚度及磨削力的变化趋势一致, 随砂轮进给速度和磨削深度的增加而增大, 随砂轮转速的增加而减小, 其最大值为8.87 μm , 最小值为4.82 μm 。在实验所选的磨削参数范围内, 磨粒实际切屑厚度处于碳化硅陶瓷临界切屑厚度的[-31.86%, 13.95%]区间内, 表明材料去除机制介于塑性去除与脆性去除之间。

关键词

碳化硅陶瓷, 小直径砂轮, 磨削加工质量, 仿真分析

Experimental Study on Grinding Damage of Silicon Carbide

Zichen Niu¹, Zhengdong An²

¹Xuzhou Meritor Axle Co., Ltd., Xuzhou Jiangsu

²Hefei BYD Auto Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: December 26, 2025; accepted: January 19, 2026; published: January 27, 2026

Abstract

Objective: To achieve high-quality and low-damage grinding of silicon carbide ceramics, this study

文章引用: 牛子晨, 安正东. 碳化硅磨削损伤实验研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(1): 283-294.

DOI: 10.12677/mos.2026.151026

conducted grinding experiments using diamond grinding wheels. Based on the actual grinding wheel topography, a grinding particle trajectory model and an undeformed maximum chip thickness model were established. The variation laws of surface topography, grinding force, and subsurface damage during grinding were systematically analyzed. Combined with finite element simulations, the influence of the undeformed maximum chip thickness of grinding particles on the surface formation mechanism of silicon carbide ceramics was further explored. The results showed that as the grinding wheel feed rate, rotational speed, and grinding depth increased, the grinding particle trajectories tended to be interlaced and dense. During this process, the maximum residual height of grinding surface grooves significantly decreased, with the maximum reduction from 13.11 μm to 4.85 μm ; surface roughness also decreased, reaching a minimum of $R_a = 1.362 \mu\text{m}$. The subsurface damage depth followed the same trend as chip thickness and grinding force, increasing with the increase of grinding wheel feed rate and grinding depth, and decreasing with the increase of grinding wheel rotational speed. The maximum value was 8.87 μm , and the minimum value was 4.82 μm . Within the range of grinding parameters selected in the experiment, the actual chip thickness of grinding particles was within the interval of $[-31.86\%, 13.95\%]$ of the critical chip thickness of silicon carbide ceramics, indicating that the material removal mechanism was between plastic removal and brittle removal.

Keywords

Silicon Carbide Ceramics, Small-Diameter Grinding Wheel, Grinding Quality, Simulation Analysis

Copyright © 2026 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

碳化硅陶瓷因其优异的热稳定性、耐磨性、耐蚀性、高硬度以及较低的热膨胀系数,在航空航天、电子设备、汽车工业、生物医药等领域得到广泛应用[1][2]。磨削是碳化硅陶瓷实现高效、高性能制造的主要加工手段[3],但由于材料本身脆性高且内部存在气孔、位错和晶界等微观结构,加工过程中易产生破碎与裂纹,严重影响成品质量并制约其应用拓展[4]。为实现碳化硅陶瓷的高精度、高质量与低损伤加工,目前学者多倾向于采用小直径、高粒度砂轮进行磨削,通过控制磨粒未变形最大切屑厚度来优化材料去除过程[5]。

Solhtalab 等人[6]通过对 BK7 光学玻璃进行磨削实验,证实最大未变形切屑厚度与亚表面损伤直接相关,且当该厚度足够小时,可实现材料的塑性域超精密磨削,从而有效降低亚表面损伤。阎秋生等人[7]使用小直径 CBN 砂轮平面磨削铸铁的研究表明,随着单颗磨粒最大切屑厚度的减小,磨削弧长随之增大,这使得 CBN 磨粒变得更难脱落,可以让砂轮的磨削性能利用得到进一步提升。Li 等人[8][9]建立了预测脆性材料改性层与基体界面应力分布的力学模型,为脆性材料的塑性域去除提供了理论支持。戴剑博等人[10][11]通过单颗金刚石磨粒划擦实验,构建了碳化硅陶瓷表面划痕形貌随切屑厚度增加的演变模型,发现小直径磨粒能更有效抑制加工裂纹扩展。

本研究选取金刚石砂轮开展碳化硅陶瓷的磨削试验,结合砂轮实际形貌特征,构建砂轮磨粒运动轨迹及磨粒未变形最大切屑厚度(下称“切屑厚度”)相关模型。分析不同工艺参数磨粒运动轨迹和切屑厚度的变化规律以及对加工表面质量、磨削力以及亚表面损伤深度的影响,并采用 Voronoi 方法搭建碳化硅陶瓷微观结构模型,从微观视角观察切屑厚度对材料内部应力演变的作用机制。

2. 实验

2.1. 样品制备

本次实验所用机床为德国 DMC650V 高速立式加工中心, 加工样品为六方晶体 α 碳化硅, 尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2.7\text{ mm}$, 如图 1 所示。使用直径 12 mm 、磨粒粒度为 $300\text{ 目}(48\text{ }\mu\text{m})$ 的金刚石砂轮外圆面对工件进行磨削加工, 所用磨削液为 5% 水溶性乳化液。由于金刚石砂轮在磨削 SIC 陶瓷时易发生磨粒脱落、损耗等情况从而减弱磨削加工效果, 为排除砂轮损耗带来的影响, 每组试验后将更换相同粒径的金刚石砂轮。本次实验所用磨削速度 v_s 分别包括 1.57 、 3.4 、 5.23 m/s , 进给速度 v_w 分别包括 10 、 40 、 70 、 100 mm/min 和磨削深度 a_p 分别包括 10 、 20 、 $30\text{ }\mu\text{m}$, 共采用 8 组工艺参数对同一批次样品进行磨削加工, 具体参数及样品编号如表 1 所示。其中, 磨削速度根据砂轮直径(12 mm)和主轴转速(3000 、 6500 、 $10,000\text{ r/min}$)换算而来。加工过程中的三轴力信号由置于工件夹具下方的力传感器实时采集。



Figure 1. Grinding device diagram
图 1. 磨削装置图

Table 1. Grinding parameters and results
表 1. 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)	表面沟槽最大高度 (μm)	磨削力 (N)	亚表面损伤深度 (μm)
#1	5.23	10	20	1.932	14.65	4.52	5.903
#2	5.23	40	20	1.655	13.11	5.27	6.033
#3	5.23	70	20	1.635	12.39	5.27	6.697
#4	5.23	100	20	1.423	10.02	6.13	7.195
#5	1.57	40	20	1.864	13.92	5.81	6.112
#6	3.41	40	20	1.689	13.58	5.44	6.055
#7	3.41	40	10	1.884	8.64	2.11	4.821
#8	3.41	40	30	1.362	4.85	9.35	8.873

*磨削速度 1.57 m/s 、 3.41 m/s 、 5.23 m/s 分别由砂轮直径 12 mm 和主轴转速 3000 、 6500 、 $10,000\text{ r/min}$ 换算得到。

2.2. 表面形貌、粗糙度及三维力检测

为磨削加工效果的综合评价提供直观依据, 本次试验借助超景深显微镜(VHX-6000, Keyence, Japan)观测不同磨削工艺参数后工件表面的二维及三维形貌。采用接触式粗糙度测试仪(SJ-210, Mitutoyo, Japan)进行表面粗糙度测量, 分别在磨削轨迹(磨粒划擦方向)平行及垂直的两个方向各采集不少于三条数据, 设定采样长度为 10 mm, 以两方向粗糙度的算术平方根作为该工件的最终表面粗糙度指标。通过力传感器(9257B, Kistler, Switzerland)采集磨削过程中 X、Y、Z 三轴的力信号, 设定采样频率为 2000 Hz, 后续利用数值分析软件对采集到的三轴力信号实施滤波处理, 并通过向量合成运算获取不同工艺参数对应的磨削力数据。

3. 实验结果

3.1. 磨削力变化

使用力传感器实时采集碳化硅陶瓷磨削过程中的三轴力信号, 不同磨削参数下的磨削力结果见表 1 和图 2。图 2(a)为磨削速度为 $v_s = 5.23 \text{ m/s}$ 、磨削深度为 $a_p = 20 \mu\text{m}$ 时, 使用不同进给速度 $v_w = 10 \text{ mm/min}$ 、 40 mm/min 、 70 mm/min 和 100 mm/min 磨削时测得的磨削力, 随着进给速度的增加, 磨削力由 4.52 N 增大到 6.13 N; 图 2(b)为进给速度为 $v_w = 40 \text{ mm/min}$ 、磨削深度为 $a_p = 20 \mu\text{m}$, 磨削速度改为 $v_s = 1.57 \text{ m/s}$ 、 3.4 m/s 、 5.23 m/s , 测得的磨削力随主轴转速增大而从 5.81 N 减小至 5.27 N。图 2(c)为磨削速度为 $v_s = 5.23 \text{ m/s}$ 、进给速度为 $v_w = 40 \text{ mm/min}$ 时, 磨削深度 a_p 改为 $10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m}$ 时, 磨削力随磨削深度的增加从 2.11 N 上升到了 9.35 N; 从中可以推测, 增大磨削深度、提升进给速度和减少磨削速度都会导致磨削力的提升。

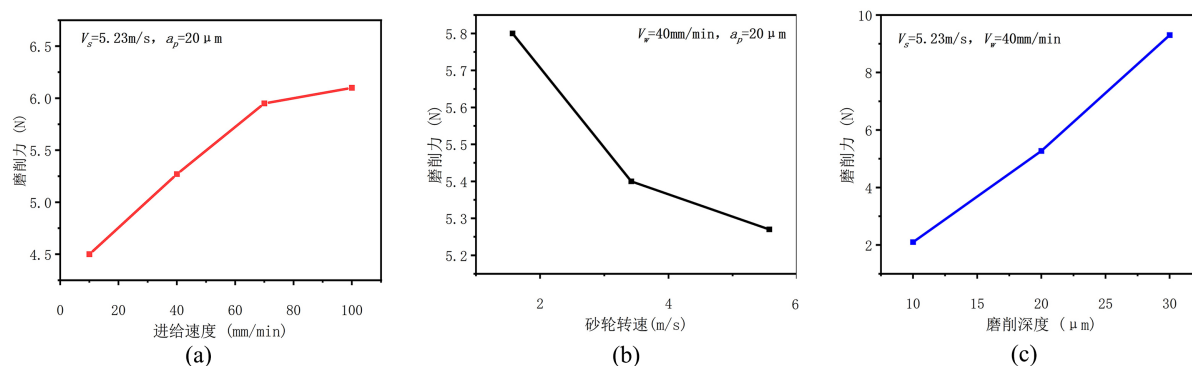


Figure 2. Grinding force obtained by different grinding parameters. (a) Change feed rate, (b) Changing the grinding wheel speed, (c) Change grinding depth

图 2. 不同磨削加工参数得到的加工磨削力。(a) 改变进给速度, (b) 改变砂轮转速, (c) 改变磨削深度

3.2. 磨削表面形貌及粗糙度

使用超景深 VHX-6000 显微镜对碳化硅陶瓷被加工表面进行观察以及三维结构测量, 通过显微镜测量可直接测量表面加工残余高度最大值, 结果如表 1 及图 3 所示。图 3 为磨削速度 $v_s = 5.23 \text{ m/s}$ 、切深 $a_p = 20 \mu\text{m}$, 且进给速度为 $v_w = 40 \text{ mm/min}$ 工艺参数下的工件表面。工件表面存在着一定量磨粒划擦所形成的沟槽和磨粒印压所形成的凹坑, 分别如图 3 中黑圈和红圈所示, 这些加工痕迹是影响表面加工质量的重要因素。红色箭头所标注的, 为表面粗糙度测量过程中探针的采样路径, 该路径分别与磨粒划擦方向呈平行和垂直关系。

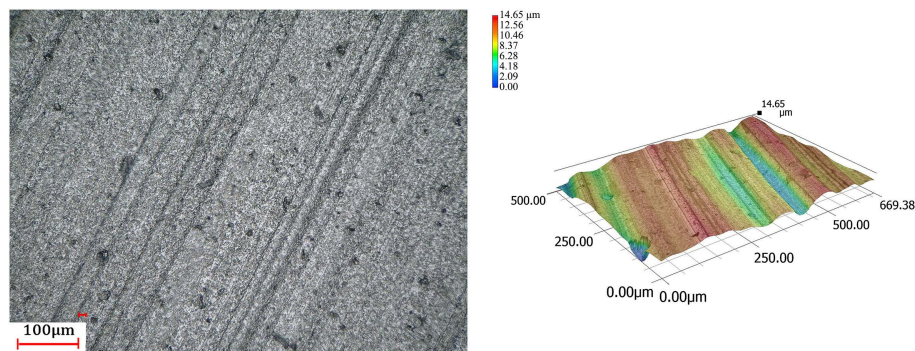
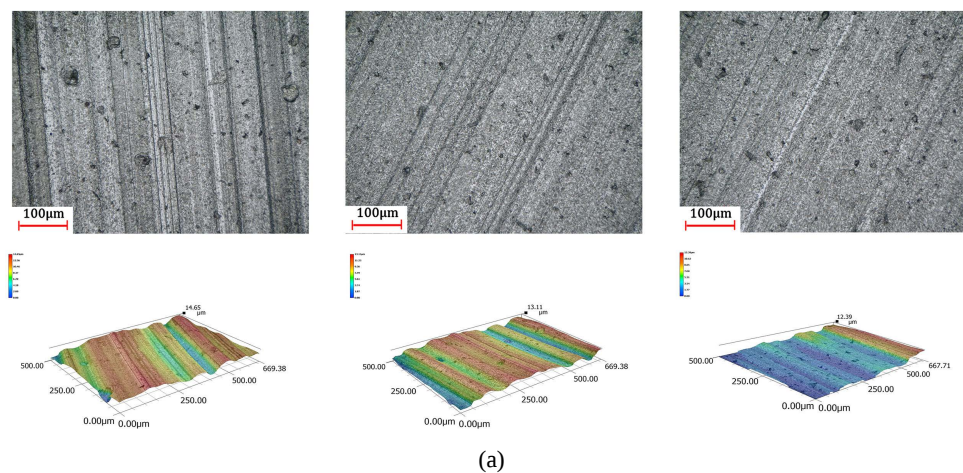


Figure 3. Surface and three-dimensional structure of silicon carbide processed

图 3. 碳化硅被加工表面及表面三维结构

图 4 呈现的是借助超景深显微镜(VXH-6000)观测获得的、不同磨削参数对应的工件表面形貌特征。

图 4(a)为磨削速度 $v_s = 5.23 \text{ m/s}$ 和磨削深度 $a_p = 20 \mu\text{m}$ 时, 进给速度 v_w 依次为 10 mm/min 、 40 mm/min 和 70 mm/min 所获得的表面形貌, 工件表面碳化硅颗粒破碎留下的孔洞面积逐渐减小, 表面残留的沟槽痕迹渐渐隐没。此时测量表面沟槽残余最大高度, 发现其从 $14.65 \mu\text{m}$ 降低到 $12.39 \mu\text{m}$, 如图 5 所示, 降幅为 15.43% , 被加工工件的表面粗糙度 R_a 也随之从 $1.932 \mu\text{m}$ 下降至 $1.635 \mu\text{m}$ 。推测是随着进给速度的增加, 材料去除效果增强, 使得工件表面残余高度下降, 粗糙度也随之下降; 图 4(b)为进给速度和磨削深度分别为 $v_w = 40 \text{ mm/min}$ 和 $a_p = 20 \mu\text{m}$ 时, 磨削速度 v_s 依次为 1.57 m/s 、 3.4 m/s 和 5.23 m/s 所获得的表面形貌, 表面残余最大高度随主轴转速上升而有一定程度的减少, 从 $13.92 \mu\text{m}$ 降低到 $13.11 \mu\text{m}$, 降低了 5.82% , 工件表面粗糙度 R_a 从 $1.864 \mu\text{m}$ 下降至 $1.655 \mu\text{m}$ 。可能是因为随着砂轮转速的提高, 单颗磨粒作用时间变短即在单位时间内参与磨削作用的磨粒数目变多, 磨削进给量增加, 使得工件表面更加平整; 图 4(c)为磨削速度 $v_s = 5.23 \text{ m/s}$ 、进给速度为 $v_w = 40 \text{ mm/min}$ 时, 磨削深度 a_p 依次为 $10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m}$ 所获得的表面形貌, 可以看到当磨削深度较低($a_p = 10 \mu\text{m}$)时, 砂轮与材料表面接触不完整, 使得工件表面残余高度并不多, 被加工表面加工痕迹以划痕为主, 且工件表面出现少量碳化硅颗粒破碎带来的坑洞, 导致整体表面粗糙度较大。当磨削深度增加至 $30 \mu\text{m}$ 时, 表面沟槽残余显著减小, 由 $13.58 \mu\text{m}$ 减小至 $4.85 \mu\text{m}$, 下降幅度高达 63.01% , 表面粗糙度 R_a 也从 $1.884 \mu\text{m}$ 下降至 $1.655 \mu\text{m}$, 说明工件表面磨痕变得更加精细。从结果可看出, 工件表面粗糙度与表面沟槽最大高度成正比, 即工件表面加工残余高度下降, 表面粗糙度也随之下降, 同时也说明与表面破碎坑洞相比, 表面沟槽残余高度对于表面粗糙度影响更大。



(a)

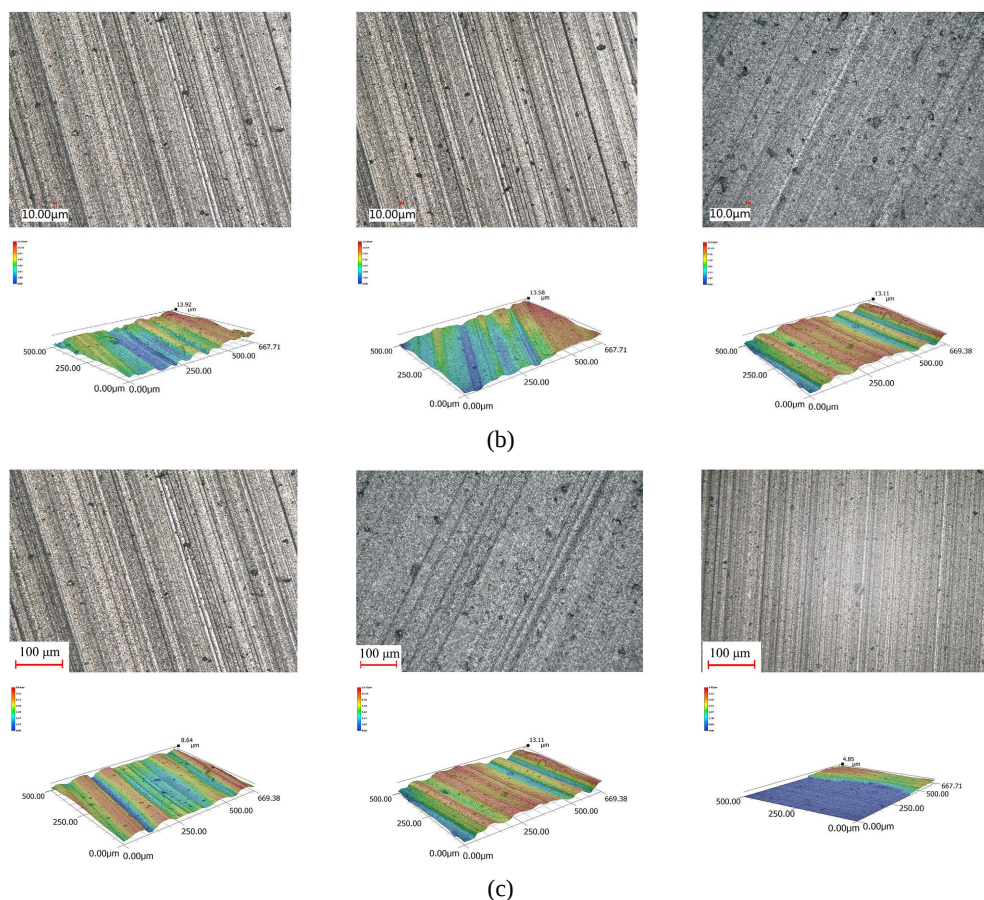


Figure 4. Surface morphology of machining changes with grinding parameters. (a) Change feed rate ($v_s = 5.23$ m/s, $a_p = 20$ μm), (b) Change the grinding wheel speed ($v_w = 40$ mm/min, $a_p = 20$ μm), (c) Change grinding depth ($v_s = 5.23$ m/s, $v_w = 40$ mm/min)

图 4. 加工表面形貌随磨削参数变化。(a) 改变进给速度($v_s = 5.23$ m/s, $a_p = 20$ μm), (b) 改变砂轮转速($v_w = 40$ mm/min, $a_p = 20$ μm), (c) 改变磨削深度($v_s = 5.23$ m/s, $v_w = 40$ mm/min)

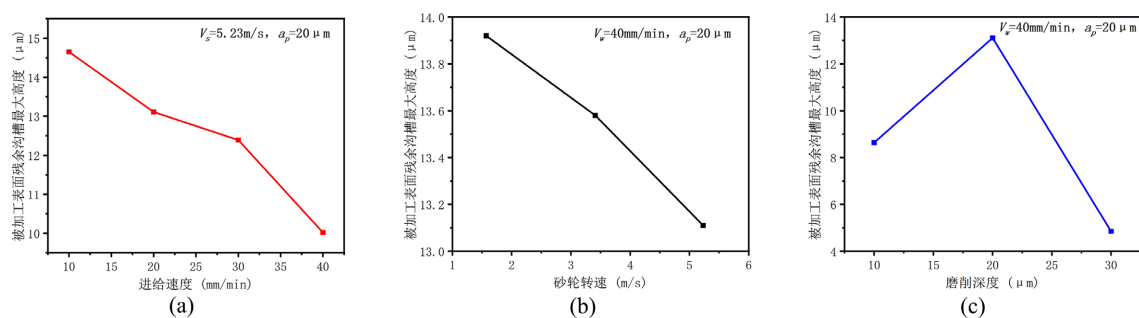


Figure 5. Maximum height of residual grooves on the machined surface under different grinding parameters. (a) Change feed rate, (b) Change the grinding wheel speed, (c) Change grinding depth

图 5. 不同磨削加工参数下被加工表面残余沟槽最大高度。(a) 改变进给速度, (b) 改变砂轮转速, (c) 改变磨削深度

3.3. 磨削亚表面损伤

磨削加工带来的亚表面损伤会严重影响材料的使用寿命, 所以需要对其进行精确测量, 本文采用角度抛光法检测不同磨削参数下的亚表面损伤深度。图 6 是当转速 5.23 m/s, 磨削深度 20 μm, 进给速度分

别为 40 mm/min 和 100 mm/min 时截面抛光高倍显微镜图, 为评估磨削工艺参数对亚表面损伤深度的作用, 借助高倍显微镜开展相关测量工作。考虑到磨削破碎层存在不均匀性这一特点, 需对不同位置的截面分别进行测量, 最终以多次测量结果的平均值作为最终数据。测量结果如图 7 和表 1 所示。当磨削速度与磨削深度分别为 $v_s = 5.23$ m/s 和 $a_p = 20$ μm 时(图 7(a)), 此时进给速度 v_w 由 10 mm/min 增大到 100 mm/min, 亚表面损伤深度由 5.903 μm 增大到 7.195 μm ; 而当进给速度与磨削深度保持为 $v_w = 40$ mm/min 和 $a_p = 20$ μm 时(图 7(b)), 增大砂轮转速, 亚表面损伤深度会由 6.112 μm 减小至 5.903 μm 。图 7(c)为磨削速度为 $v_s = 5.23$ m/s、进给速度为 $v_w = 40$ mm/min 时, 磨削深度 a_p 为 10 μm 、20 μm 和 30 μm 时所测得的磨削力, 亚表面损伤深度随磨削深度的增加从 4.821 μm 上升到了 8.873 μm 。

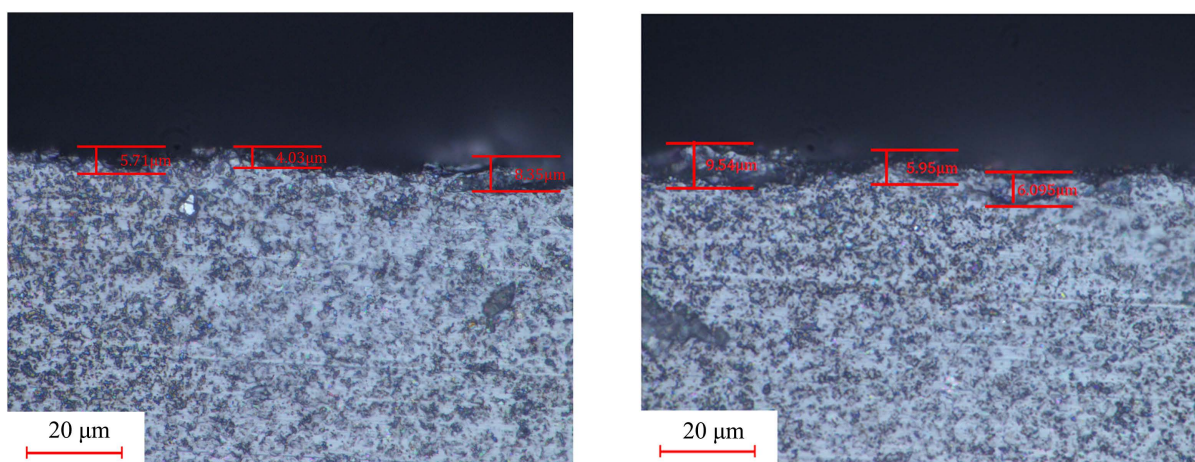


Figure 6. Measurement of subsurface damage
图 6. 亚表面损伤测量

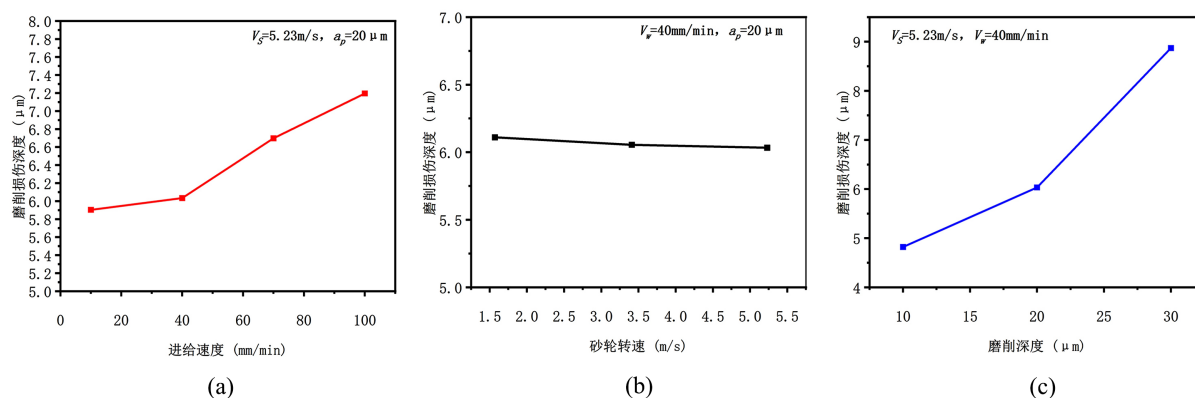


Figure 7. Subsurface damage depth obtained by different grinding parameters. (a) Change feed rate, (b) Change the grinding wheel speed, (c) Change grinding depth

图 7. 不同磨削加工参数得到的亚表面损伤深度。(a) 改变进给速度, (b) 改变砂轮转速, (c) 改变磨削深度

4. 磨粒运动轨迹与磨粒切屑厚度模型计算

4.1. 小直径金刚石砂轮实际特征提取

选用直径为 10 mm 的电镀金刚石砂轮, 磨粒粒度为 300#, 如图 8 所示。将砂轮沿周向均分为 8 个区域, 采用基恩士 VHX-6000 超景深显微镜在每个区域内沿砂轮轴向测量相邻磨粒的平均磨粒间距以及磨粒的平均出刃高度, 其分布频率直方图分别如图 8(c)和图 8(d)所示, 平均值分别为 0.375 mm 和 46.27 μm 。

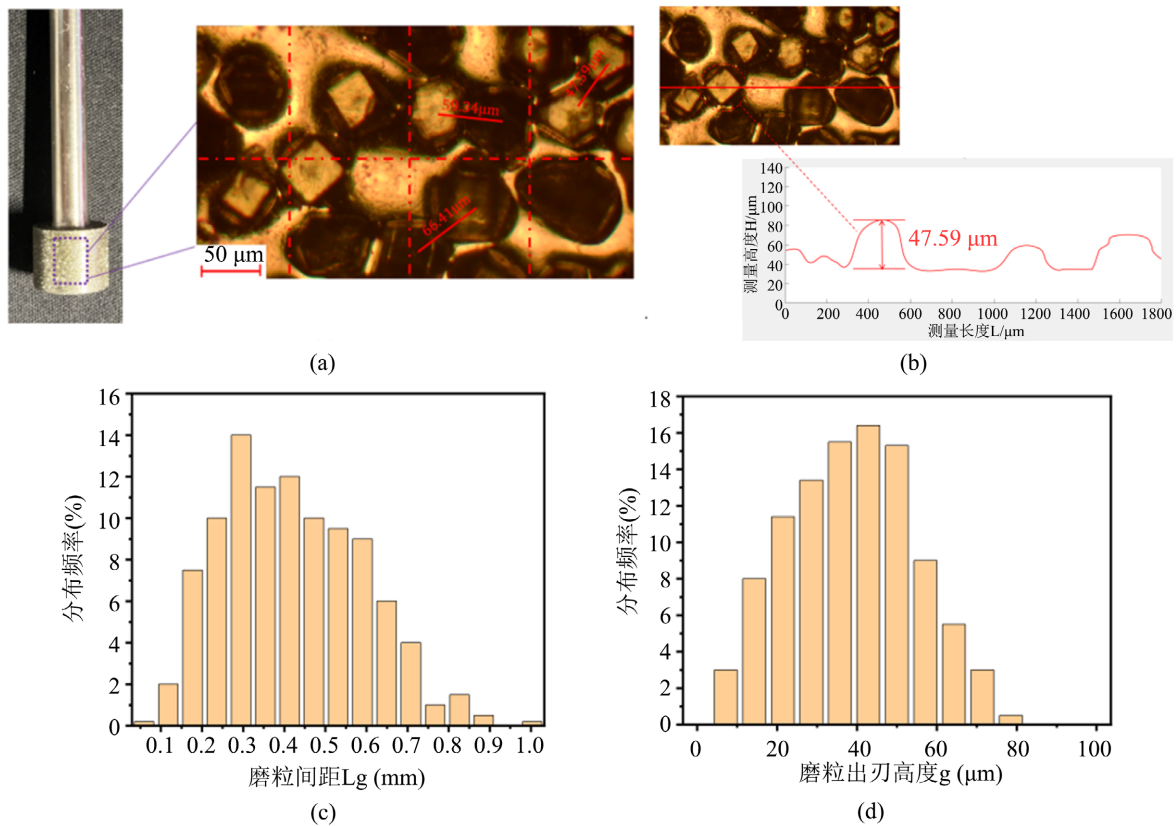


Figure 8. Measurement results of diamond grinding wheel grains. (a) Measure the average spacing between abrasive particles, (b) Measure the height of abrasive grain cutting edge, (c) Distribution map of abrasive particle spacing, (d) Distribution map of abrasive grain cutting height

图 8. 金刚石砂轮磨粒测量结果图。(a) 测量磨粒平均间距, (b) 测量磨粒出刃高度, (c) 磨粒间距分布图, (d) 磨粒出刃高度分布图

4.2. 小直径金刚石砂轮磨粒运动轨迹计算

在磨削加工中, 磨削表面的成型效果是由多磨粒的运动轨迹互相交错形成的, 受磨粒的出刃高度以及磨粒间距影响很大, 对任意单颗磨粒磨粒 i , 其二维运动轨迹类似摆线运动[12]。以第一颗磨粒的最低点作为全局坐标原点, 在此基础上, 编号为 i 的磨粒, 其运动轨迹在全局坐标系中的磨削运动可进一步表述为:

$$\begin{cases} x = \frac{(d_s + g(i))}{2} \frac{v_w}{v_s} \theta + \frac{(d_s + g(i))}{2} \sin \theta + \sum_1^i L(i) \cdot v_w / v_s \\ y = \frac{(d_s + g(i))}{2} (1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 、 y 为磨粒 i 的位置坐标; d_s 为砂轮直径, mm; v_w 为工件进给速度, mm/min; v_s 为砂轮线速度, m/s; θ 为磨粒的相对转角, rad; $g(i)$ 为磨粒 i 的平均出刃高度; $L(i)$ 为平均磨粒间距。

基于上述轨迹方程, 将 300# 砂轮实际特征信息以及磨削加工工艺参数输入模型, 可得到不同磨削工艺参数下磨粒运动轨迹图。不同磨削工艺参数下, 磨粒运动轨迹线路密集程度、分布情况各不同, 进而利用图像处理软件 Image J 对各运动轨迹线条数目进行定义, 将提取到的线条数目视为磨粒运动轨迹输出量, 依次量化评价其变化规律。以进给速度为例, 由图 9 的磨削轨迹可知, 当砂轮转速以及磨削深度

不变时, 此时进给速度从 40 mm/min 增加到 100 mm/min 时, 单位时间内磨削轨迹线数目增加了 42.17%。这与实验数据相匹配, 随着砂轮进给速度增加, 此时基线间距减小, 轨迹线互相交错更加密集, 磨削时砂轮磨粒与碳化硅陶瓷的有效接触区面积增加, 使得工件表面沟槽残余最大高度降低, 同时表面粗糙度下降, 加工质量得到提升。

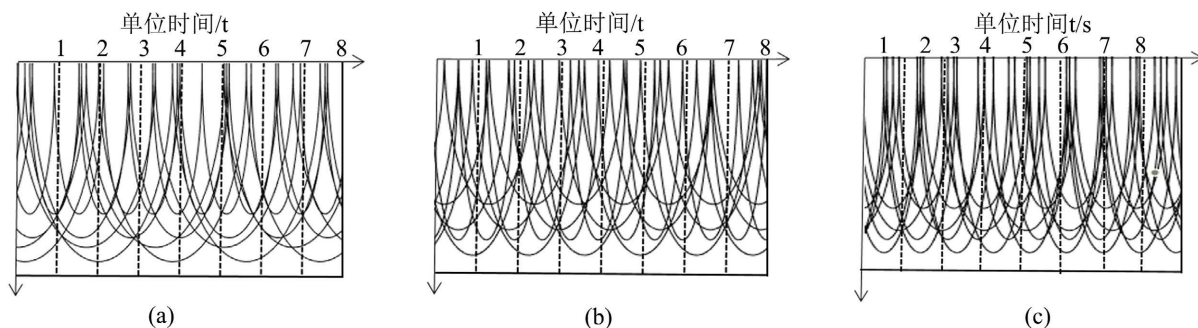


Figure 9. Simulation diagram of abrasive particle motion trajectory. (a) $v_s = 5.23$ m/s, $v_w = 40$ mm/min, $a_p = 20$ μ m; (b) $v_s = 5.23$ m/s, $v_w = 70$ mm/min, $a_p = 20$ μ m; (c) $v_s = 5.23$ m/s, $v_w = 100$ mm/min, $a_p = 20$ μ m

图 9. 磨粒运动轨迹模拟图。(a) $v_s = 5.23$ m/s, $v_w = 40$ mm/min, $a_p = 20$ μ m; (b) $v_s = 5.23$ m/s, $v_w = 70$ mm/min, $a_p = 20$ μ m; (c) $v_s = 5.23$ m/s, $v_w = 100$ mm/min, $a_p = 20$ μ m

4.3. 小直径金刚石砂轮磨粒切屑厚度计算

考虑实际砂轮特征, 实际磨粒切厚可表示为

$$h_m = 2 \cdot L(i) \cdot \frac{v_w}{v_s} \cdot \sqrt{\frac{a_p}{d_s + g(i)}} - \frac{(L(i) \cdot v_w / v_s)^2}{d_s + g(i)} \quad (2)$$

式中, a_p 为磨削深度; d_s 为工具直径; h_m 为磨屑切厚。

将理论计算公式代入 MATLAB 中, 得到不同磨削工艺参数下磨粒切厚的变化趋势, 如图 10。仿真结果表明, 磨粒最大切屑厚度随砂轮进给速度与磨削深度的增大而增加, 随砂轮转速的提升而减小。在实验所选工艺参数中, 当砂轮转速 $v_w = 5.23$ m/s、磨削深度 $a_p = 20$ μ m 保持不变时, 将进给速度从 10 mm/min 增大到 100 mm/min 时, 切屑厚度由 0.293 μ m 增大到了 0.462 μ m。而保持进给速度 $v_w = 40$ mm/min、磨削深度 $a_p = 20$ μ m, 此时砂轮转速从 1.57 m/s 增大到 5.23 m/s, 相对应的切屑厚度由 0.39 μ m 降低到 0.337 μ m。磨削深度对于切屑厚度的影响是最为显著的, 它可以明显提高切屑厚度变化上限, 当砂轮转速 $v_w = 5.23$ m/s、进给速度 $v_w = 40$ mm/min 保持不变时, 将磨削厚度从 10 μ m 提高到 30 μ m, 切屑厚度将从 0.217 μ m 显著提升到 0.493 μ m。

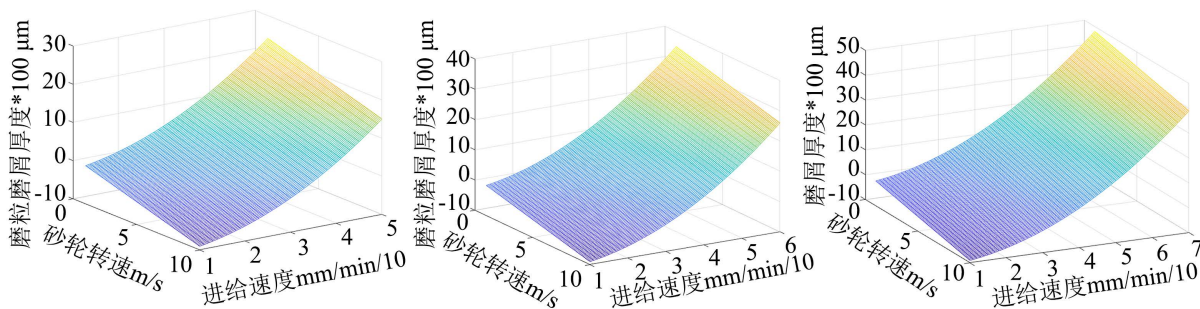


Figure 10. Simulation diagram of maximum chip thickness without deformation of abrasive particles

图 10. 磨粒未变形最大切屑厚度模拟图

4.4. 脆性去除切屑厚度临界值计算

根据 Bifano 等人[13]理论, 碳化硅陶瓷磨削时切屑厚度临界 h_{pm} 可表示为:

$$h_{pm} = 0.15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_{JC}}{H} \right)^2 \tag{3}$$

Chen M 等人[14]-[16]根据纳米压痕实验和 Griffith 准则对这一方程进行了改进, 此时 h_{pm}^* 为:

$$h_{pm}^* = \lambda \operatorname{ctg} \varphi \sqrt{\frac{2k_1}{\beta}} \left(\frac{K_{IC}^*}{H} \right)^2 \tag{4}$$

式中, λ 是一基于实验条件的系数, φ 是磨粒切削刃处半顶角大小, K_1 是一无量纲常数, β 是接触区半径大小。

当实际切屑厚度 h_p 小于最大切屑厚度临界 h_{pm}^* 时, 则认为此时材料去除在塑性变形阶段, 反之, 材料将呈现脆性去除特征。本次研究所使用的碳化硅陶瓷切屑厚度临界值经计算为 $0.43 \mu\text{m}$, 实验中所使用的磨粒切屑厚度工艺经计算在 $0.217 \sim 0.493 \mu\text{m}$ 之间, 即临界值[-31.86%, 13.95%]领域内, 说明碳化硅颗粒的去除形式介于纯塑性去除以及脆性去除之间。这一点也可以在抛光截面图中得到印证, 如图 6, 图中可以直观地观察到碳化硅陶瓷材料去除介于塑性区域去除与脆性去除之间, 此时材料表面会出现部分碳化硅颗粒的破碎进而产生损伤层, 但大面积脱落剥离以及材料内部裂纹的产生并不明显。

5. 表面质量形成机制仿真

采用维诺图理论(Voronoi diagrams)建立碳化硅陶瓷几何模型(图 11), 通过改变单颗磨粒划擦深度的方式代替不同磨削工艺参数下各异的磨粒最大磨削厚度, 以便更好地观察对碳化硅陶瓷显微结构损伤形式。碳化硅尺寸为 $100 \times 30 \mu\text{m}^2$, 包含 455 个碳化硅颗粒, 平均颗粒粒径为 $3.5 \mu\text{m}$, 力学性能为 JH-2 本构模型, 具体参数见表 2。金刚石磨粒刃圆半径为 $5.83 \mu\text{m}$, 切削前角为 73° 。

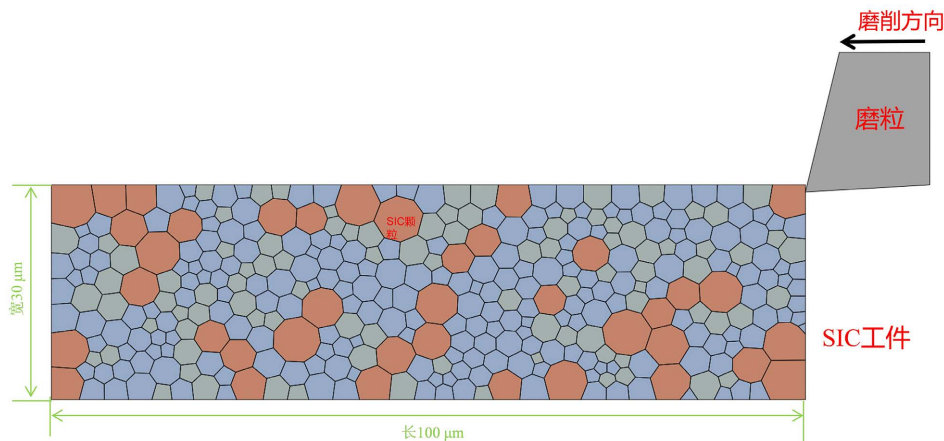


Figure 11. Simulation model for single diamond abrasive grinding of silicon carbide ceramics
图 11. 单颗金刚石磨粒磨削碳化硅陶瓷仿真模型

Table 2. JH-2 constitutive model parameters of silicon carbide particles
表 2. 碳化硅颗粒 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

图 12 是通过单颗金刚石磨削多晶碳化硅陶瓷有限元仿真获得的表面形貌以及应力分布, 考虑到建模使用的碳化硅陶瓷部分材料性能理论值与实际值存在一定偏差, 此仿真结果意在观察不同切屑厚度下材料的损伤形式, 并不是为了得到碳化硅陶瓷塑脆性转变的临界值。从仿真结果可以发现切屑厚度对碳化硅表面质量影响具有以下特点: 1) 当切屑厚度处于较小水平时, 碳化硅陶瓷磨削亚表面的损伤形式以微裂纹为主, 未观察到显著的宏观裂纹; 且此类微裂纹损伤多集中在紧邻磨削表面的碳化硅颗粒内部, 即亚表面裂纹的损伤深度未超过单个颗粒的尺寸范围; 2) 随着切屑厚度增加, 碳化硅陶瓷颗粒破碎程度显著增加, 并且破碎区逐渐向晶界处聚集, 继续增加切屑厚度, 会此时损伤裂纹向更深层碳化硅颗粒蔓延, 使得碳化硅颗粒部分区域发生剥离、脱落等情况, 从而在宏观层面实现了材料去除; 3) 应力大小变化趋势与磨削力变化趋势相同, 当切屑厚度较小时, 此时碳化硅陶瓷内部应力值较小, 材料去除以塑性去除为主, 碳化硅颗粒的完整性让应力有一定传播范围。当切屑厚度增加时, 应力增大, 材料处于塑性、脆性去除共存阶段, 材料表面碳化硅颗粒开始破碎, 应力传播此时受阻, 集中于接触面和晶界处; 随着切屑厚度进一步增加, 表面第一层碳化硅颗粒开始破碎以及脱落, 应力从第二层颗粒内部开始传播, 影响范围大幅增大, 此时材料去除以塑性去除为主。

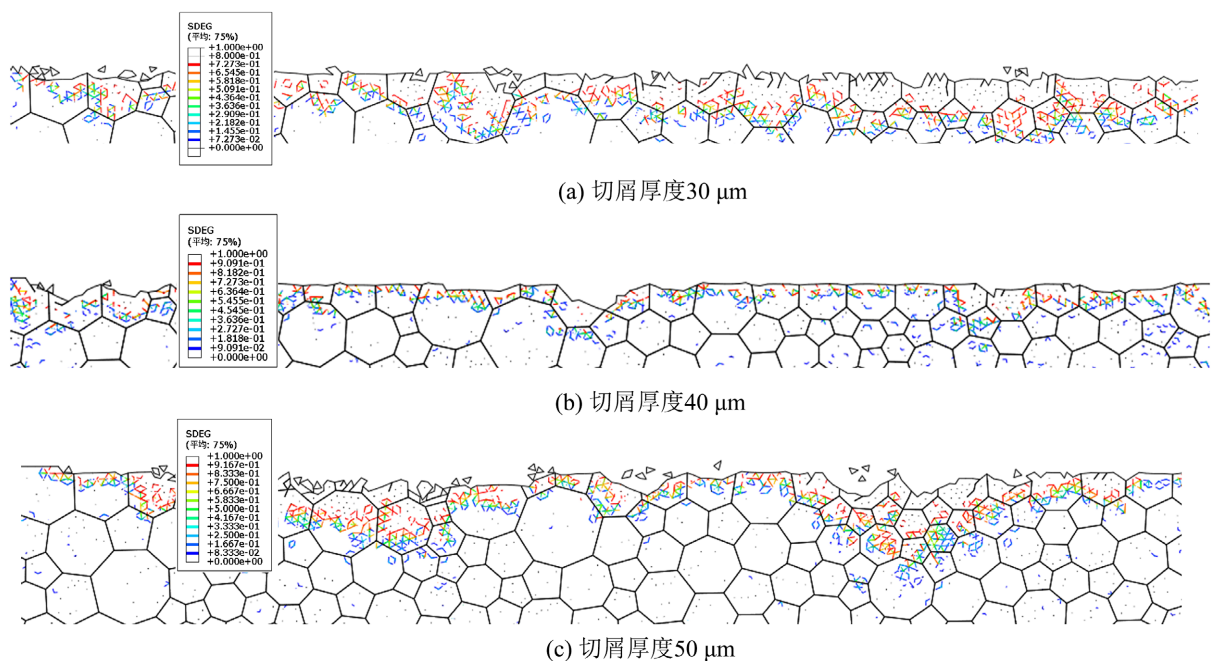


Figure 12. Fragmentation and internal stress distribution of silicon carbide ceramic particles
图 12. 碳化硅陶瓷颗粒破碎情况以及内部应力分布

6. 结论

本文通过实验和仿真相结合的方法, 研究了金刚石砂轮磨削碳化硅陶瓷过程中磨粒最大未变形切屑厚度对于磨削质量的影响, 得到的结论如下:

从实验结果来看, 磨粒最大未变形切屑厚度与表面粗糙度、亚表面损伤深度具有明确的相关性, 切屑厚度的提升会带来表面粗糙度下降、亚表面损伤深度增加的双重效应。本次研究所使用的碳化硅陶瓷切屑厚度临界值介于实验中磨粒实际切屑厚度之间, 使得碳化硅颗粒的去除形式处于塑性去除以及脆性去除之间。

基于磨粒运动轨迹与切屑模型的仿真分析可知, 在本研究参数范围内, 提高砂轮转速与进给速度可

减小轨迹轮廓间距、让轮廓线更密集, 最终降低工件表面沟槽高度与粗糙度。磨削切屑厚度的变化规律为: 随进给速度和磨削深度增大而上升, 随砂轮转速提高而下降, 该趋势与亚表面损伤的变化保持同步。

磨削力随着进给速度以及磨削深度的增加而增大, 随着砂轮转速的增大而减小。

碳化硅陶瓷的仿真分析表明, 切屑厚度是影响材料损伤与去除方式的关键因素: 切屑厚度较小时, 损伤集中于第一层颗粒, 应力区域较小; 随着切屑厚度增加, 内部应力急剧上升, 应力范围扩展至第二层及下层颗粒, 材料破碎程度加大, 去除方式相应从塑性模式向脆性模式转变。

参考文献

- [1] Dzurak, A. (2011) Diamond and Silicon Converge. *Nature*, **479**, 47-48. <https://doi.org/10.1038/479047a>
- [2] Shore, P., Cunningham, C., DeBra, D., Evans, C., Hough, J., Gilmozzi, R., *et al.* (2010) Precision Engineering for Astronomy and Gravity Science. *CIRP Annals*, **59**, 694-716. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.003>
- [3] 于思远, 林彬. 工程陶瓷材料的加工技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] Venu Gopal, A. and Venkateswara Rao, P. (2003) Selection of Optimum Conditions for Maximum Material Removal Rate with Surface Finish and Damage as Constraints in Sic Grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **43**, 1327-1336. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(03\)00165-2](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(03)00165-2)
- [5] Sun, Y., Su, Z., Jin, L., Gong, Y., Ba, D., Yin, G., *et al.* (2021) Modelling and Analysis of Micro-Grinding Surface Generation of Hard Brittle Material Machined by Micro Abrasive Tools with Helical Chip Pocket. *Journal of Materials Processing Technology*, **297**, Article 117242. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117242>
- [6] Solhtalab, A., Adibi, H., Esmaeilzare, A. and Rezaei, S.M. (2019) Cup Wheel Grinding-Induced Subsurface Damage in Optical Glass BK7: An Experimental, Theoretical and Numerical Investigation. *Precision Engineering*, **57**, 162-175. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.04.003>
- [7] 秋生, 田中宪司, 庄司克雄. 小直径 CBN 砂轮的磨削特性研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(5): 103-106.
- [8] Li, W., Long, G., Shi, F., Zhou, S., Yin, J. and Yang, J. (2022) Influence of the Fiber Orientation on 3D C/C-SiC Composite Material and Its Formation Mechanism of the Machining Surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **118**, 2725-2743. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08149-1>
- [9] Li, W., Jiao, Y., Jiang, H., Ren, Y. and Ibrahim, A.M.M. (2022) Investigation of Mechanical Force Acting on the Surface Modified-Substrate Layer Area during the Chemical-Mechanical Micro-Grinding of Monocrystalline Silicon. *International Journal of Mechanical Sciences*, **228**, Article 107482. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107482>
- [10] 戴剑博, 苏宏华, 傅玉灿, 司垒. 磨削速度对碳化硅陶瓷磨削损伤影响机制研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(21): 316-330.
- [11] 于腾飞, 苏宏华, 周文博. 单颗磨粒磨削碳化硅陶瓷力与比能研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(1): 120-125.
- [12] 肖玉斌, 梁志强, 袁剑平. 合金淬硬钢 20Cr2Ni4A 小直径 CBN 砂轮磨削研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(2): 134-137+142.
- [13] Bifano, T.G., Dow, T.A. and Scattergood, R.O. (1991) Ductile-Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials. *Journal of Engineering for Industry*, **113**, 184-189. <https://doi.org/10.1115/1.2899676>
- [14] Chen, M., Zhao, Q., Dong, S. and Li, D. (2005) The Critical Conditions of Brittle-Ductile Transition and the Factors Influencing the Surface Quality of Brittle Materials in Ultra-Precision Grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, **168**, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.11.002>
- [15] Subramanian, K., Ramanath, S. and Tricard, M. (1997) Mechanisms of Material Removal in the Precision Production Grinding of Ceramics. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **119**, 509-519. <https://doi.org/10.1115/1.2831181>
- [16] Chen, M., Shen, D., Li, D. and Zhang, F. (2001) Study on the Influence Factors of the Surfaces Quality in Ultra-Precision Grinding Machining of Brittle Materials. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **37**, 1-4.