

SiC陶瓷的磨削去除机理及参数对磨削力影响

周云光^{1,2,3}, 田川川¹, 王书海¹, 陈 晗¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中航沈飞民用飞机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110850;

3. 秦皇岛瑞方机械有限公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 为探究SiC陶瓷的磨削去除机理及磨削参数对磨削力影响规律,基于SPH(smoothed particle hydrodynamics)法建立了单磨粒冲击SiC陶瓷仿真模型,分析了SiC磨削裂纹产生和扩展机制;通过单因素试验分析了 v_s 、 v_w 和 a_p 对SiC磨削去除机理、法向磨削力和切向磨削力的影响规律.结果表明,磨粒冲击导致中位裂纹和横向裂纹产生,随着磨粒压入深度的增加,横向裂纹向材料近表面区域扩展,当横向裂纹扩展至材料表面形成脆性断裂;随着 v_s 的增大, v_w 和 a_p 的减小,磨削表面产生的凹坑区域和凹坑深度减小,塑性去除区域变大,法向磨削力和切向磨削力均呈减小趋势.研究成果为SiC构件的高效低损伤加工提供重要依据.

关 键 词: 磨削;去除机理;磨削力;SiC陶瓷;SPH

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)04-0548-07

Removal Mechanism and Effect of Parameters on Grinding Force in Grinding SiC Ceramics

ZHOU Yun-guang^{1,2,3}, TIAN Chuan-chuan¹, WANG Shu-hai¹, CHEN Han¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. AVIC SAC Commercial Aircraft Company Ltd., Shenyang 110850, China; 3. Qinhuangdao Ruifang Machinery

Company Limited, Qinhuangdao 066000, China. Corresponding author: ZHOU Yun-guang, E-mail:

zhouyunguang@neuq.edu.cn)

Abstract: In order to explore the removal mechanism and influence law of grinding force in grinding SiC ceramics, the simulation model of single abrasive striking SiC ceramics was established based on the SPH (smoothed particle hydrodynamics) method, and the crack generation and propagation mechanism during grinding SiC ceramics were analyzed; the effect of grinding velocity (v_s), feeding rate (v_w) and grinding depth (a_p) on the removal mechanism, the normal grinding force and tangential grinding force of grinding SiC ceramics were analyzed by the single factor experiment. The results showed that the abrasives striking the workpiece lead to the generation of the median cracks and the transverse cracks. With the increase of abrasive pressing depth, the transverse crack expands to the material surface, and when the transverse crack expands to the material surface, the brittle fracture occurs. With the increase of v_s , the decrease of v_w and a_p , and the decrease of the area and depth of the pits on the grinding surface, the plastic removal area becomes larger, and the normal grinding force and tangential grinding force both decrease. These results may provide an important basis for high-efficiency and low-damage machining of SiC ceramic components.

Key words: grinding; removal mechanism; grinding force; SiC ceramics; SPH

SiC陶瓷具有硬度高、热膨胀系数低、防腐、耐磨等优点,在航空航天、国防工业、汽车工业等

领域具有广阔的应用前景^[1].磨削是硬脆材料的主要加工方法,约占整个加工工艺过程的80%,

收稿日期: 2022-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905083, 51975113); 河北省自然科学基金资助项目(E2022501004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2123025, N2203015); 中国博士后科学基金资助项目(2021MD703912).

作者简介: 周云光(1986-),男,河北秦皇岛人,东北大学副教授.

使用金刚石砂轮对硬脆材料进行磨削可以获得较好的表面质量和加工效率^[2].而SiC陶瓷的高硬脆特性使其成为典型难加工材料,磨削加工性差.磨削过程中容易发生脆性断裂,出现表面/亚表面损伤,影响零件的使用寿命,限制了其应用范围.材料磨削去除过程直接影响着磨削表面/亚表面损伤形式,磨削力是影响磨削表面/亚表面质量的主要因素.因此,研究SiC陶瓷的磨削去除机理、裂纹扩展机制、法向磨削力和切向磨削力对获得良好的磨削表面质量和提高SiC陶瓷零件的磨削加工效率具有重要意义.

许多学者对SiC陶瓷的磨削去除机理和磨削力进行了研究.Meng等^[3]利用纳米划痕试验和仿真法分析了SiC磨削过程中的微观变形和去除机理,得出SiC的塑性去除是加工区域非晶化、位错、层错和相变综合作用的结果,脆性断裂时产生中位裂纹、横向裂纹和径向裂纹.于腾飞等^[4]分析了磨削工艺参数对SiC去除形式和磨削力的影响规律,提高磨削速度可以增加材料塑性去除的比例,显著降低磨削力和磨削比能;单颗磨粒切厚为0.03 μm 和1 μm 时,磨削力和磨削比能随着磨削速度的增加而减小,而当切厚为0.3 μm 时,磨削力和磨削比能随着磨削速度的增加而先增加后减小.Cao等^[5]通过单颗磨粒划痕试验和SPH法研究了SiC陶瓷的超声振动辅助磨削去除机理,得出超声振动辅助磨削通过磨粒的冲击和切削作用实现材料去除,超声振动使变形场从冲击部位展开,形成较深的刻划深度,并增加了径向和横向裂纹尺寸.Zheng等^[6]分析了硬脆材料磨削去除机理,得出塑性去除和脆性断裂是主要去除方式;建立了考虑砂轮表面磨粒随机分布和磨粒突出高度分布的磨削力模型.Zhu等^[7]采用单磨粒仿真法研究了可控最大未变形切削厚度下SiC磨削过程中的裂纹产生和扩展过程,结果显示,单颗磨粒切削厚度在0.3 μm 以内时, SiC以塑性去除为主,切削厚度超过0.3 μm 时, SiC以脆性去除为主,产生横向裂纹.在脆性断裂阶段,磨削速度对磨削质量影响显著.刘瑞虎等^[8]采用SPH法进行了SiC陶瓷三维磨削仿真,分析了磨削速度和磨削深度对材料去除率和磨削力的影响规律.谢桂芝等^[9]分析了可加工陶瓷高速深磨损伤机理,建立了法向磨削力和切向磨削力的理论预测模型,并分析了磨削参数对磨削力的影响规律,得出随着磨削速度的增加、进给速度和磨削深度的减小,磨削力减小,而且磨削参数对塑

性去除阶段磨削力的影响要大于脆性去除阶段.Gong等^[10]采用单因素试验分析了磨削工艺参数对SiC陶瓷法向磨削力和切向磨削力的影响规律,得出磨削力随着进给速度、磨削深度的减小和磨削速度的增加而减小.Wu等^[11]建立了考虑脆-塑共存去除模式下的硬脆材料磨削力理论模型,塑性去除磨削力由摩擦力、耕犁力和切削力组成,脆性去除主要由摩擦力和脆性断裂力组成.Guo等^[12]考虑了砂轮表面磨粒突出高度随机分布形式,建立了陶瓷磨削过程中脆性去除和塑性去除下的磨削力数学模型,并分析了磨削工艺参数对磨削力的影响规律.

尽管学者针对SiC陶瓷的磨削去除机理、磨削力建模及影响规律等方面进行了一定的研究,但关于该材料的微观去除机理、裂纹扩展行为及磨削力等方面缺乏系统研究.因此,本文基于Ls-DYNA的SPH法和单因素磨削试验分析了SiC磨削过程中的裂纹产生及扩展机制,研究了磨削工艺参数对磨削去除机理、法向磨削力和切向磨削力的影响规律.这对实现防腐耐磨SiC陶瓷构件的高效低损伤加工目标具有重要意义.

1 SiC陶瓷单因素磨削试验

1.1 试验设备

试验机床:TC500R高精度立式加工中心,如图1a所示;测力系统包括Kistler 9119AA2紧凑型多分量测力仪、Kistler 5080A型模块化八通道电荷放大器、Kistler 5697A型数据采集系统,如图1a所示.试验刀具:直径为10 mm、表层电镀200#(磨粒直径约为74 μm)金刚石磨粒的砂轮,如图1b所示,磨削表面形貌检测采用SEM观察.

1.2 试验方案

试验主要考察SiC陶瓷磨削过程中的砂轮速度(v_s)、工件进给速度(v_w)和磨削深度(a_p)对SiC陶瓷材料磨削去除机理、法向磨削力和切向磨削力的影响规律.设计单因素试验方案的主要磨削参数如表1所示.

2 试验结果及分析

2.1 微裂纹扩展机制

光滑粒子流体动力学(SPH)是一种无网格有限元仿真模拟方法,与网格划分法相比,其突出优点是具有更高的计算精度和准确性,并且不会产生由于网格畸变而导致终止计算的问题.硬脆

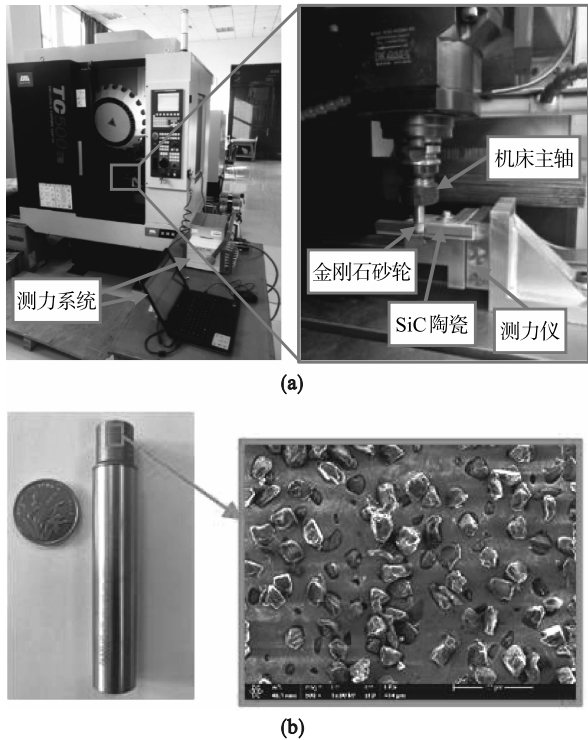


图 1 试验设备

Fig. 1 Experimental equipment

(a) — 试验机床及测力系统; (b) — 电镀金刚石砂轮.

表 1 SiC 单因素磨削试验方案

Table 1 Single factor experimental scheme of grinding SiC

试验序号	主轴转速 v_s r·min ⁻¹	进给速度 v_w mm·min ⁻¹	磨削深度 a_p μm
1	12 000	50	20
2	12 000	250	20
3	12 000	450	20
4	12 000	650	20
5	2 000	250	20
6	7 000	250	20
7	17 000	250	20
8	12 000	250	10
9	12 000	250	30
10	12 000	250	40

性材料磨削仿真时,需要深入研究材料的结构破坏及裂纹扩展机制,在这过程中材料受到挤压会发生很大的变形.基于Ls-DYNA的SPH法在保证计算精度和准确性的前提下对于处理材料大变形仿真问题具有更明显的优势.本节基于SPH法进行单颗磨粒冲击SiC陶瓷的模拟仿真,研究压入过程中材料断裂以及裂纹扩展机制.仿真中单颗磨粒的形状设定为锥顶角137°的四棱锥,SiC陶瓷使用Johnson_Holmquist_Ceramics(JH-2)本构模型.JH-2本构模型是在JH-1本构模型

的基础上,加入强度的连续损伤劣化效应来描述材料的破坏过程,应力在加载的过程中,材料首先表现出塑性变形,在应力达到材料的屈服极限后,材料开始发生破坏直至完全破碎.JH-2本构模型所描述的材料破坏过程与硬脆材料磨削过程中所经历的去屑方式转变一致,因此可以较好地模拟硬脆材料磨削过程中材料的去除形式以及微裂纹的扩展过程.SiC陶瓷的JH-2本构模型参数如表2所示.表中: A 为初始强度参数; B 为断裂强度系数; C 为应变率系数; M 为断裂强度指数; N 为初始强度指数;HEL为Hugoniot弹性极限; D_1, D_2 为塑性断裂应变参数; K_1, K_2 为第一、二压力系数; K_3 为弹性常数.

JH-2本构模型如式(1)所示:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*). \quad (1)$$

式中: σ^* 为标准化等效应力; D 为材料的损伤,是由 $D = \sum \Delta \epsilon^p / \epsilon_f^p, 0 \leq D \leq 1$ 定义的, $\Delta \epsilon^p$ 是整个循环中的塑性应变, ϵ_f^p 是在压力 p 下断裂的塑性应变,其表达式为

$$\epsilon_f^p = D_1(P^* + T^*)^{D_2}, \quad (2)$$

其中 P, D_1, D_2 是模型常数; i 和 f 为第 i 个粒子和第 f 个粒子,当 $D=0$ 时,材料完好, σ_i^* 为完整材料的等效应力;当 $D=1$ 时,材料发生断裂, σ_f^* 为损伤材料的等效应力.

表 2 SiC 陶瓷材料的 JH-2 本构模型参数
Table 2 JH-2 constitutive model parameters of SiC ceramic material

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	3 163
剪切模量/GPa	183
抗拉强度/GPa	0.37
A	0.96
B	0.35
C	0.0
M	1.0
N	0.65
HEL/GPa	14.567
D_1	0.48
D_2	0.48
K_1	204.785
K_2	0
K_3	0

图 2 为磨粒压入 SiC 陶瓷表面横向裂纹产生情况.由图 2 可知,当磨粒与 SiC 陶瓷开始接触时会在接触点附近产生局部微裂纹,如图 2a 所

示,并且在裂纹扩展前并未产生材料崩碎现象.随着压入深度的增加,径向裂纹不断向材料外部扩展延伸,并导致材料发生崩碎去除,如图 2b 所示.

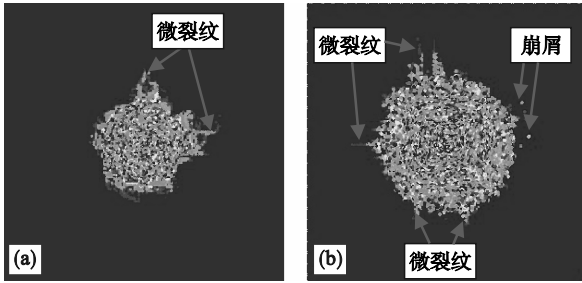


图 2 磨粒压入 SiC 陶瓷表面横向裂纹产生情况
Fig. 2 Transverse crack generation when the abrasives press into SiC ceramic surface
(a)— $t=0.02 \mu\text{s}$; (b)— $t=0.04 \mu\text{s}$.

图 3 为 SiC 陶瓷内部横向裂纹以及中位裂纹的产生情况.图中选取了不同压入深度下的等效塑性应变图作为参考,即磨粒压入 SiC 陶瓷不同时刻的剖面情况.由图 3 可知,当磨粒开始压入工件表面时横向裂纹并没有产生,而是首先在压头尖端部分产生了中位裂纹,如图 3a 所示.随着磨粒压入深度的增加,材料内部产生的中位裂纹向材料内部进一步扩展.而且磨粒与工件材料接触区域会产生塑性应变,当应变值较大时,磨粒与工件接触区的应力会导致材料内部产生横向裂纹,同时横向裂纹会向近工件表面偏转和扩展.当横向裂纹扩展至材料表面形成封闭之后就会导致材料发生脆性断裂,加工表面形成脆性断裂凹坑.随着磨粒压入 SiC 陶瓷深度的增加, SiC 陶瓷工件表面材料在磨粒的冲击作用下向外飞散,形成大量的颗粒碎屑.可见,横向裂纹有利于材料的去除,提高材料的去除效率,但是中位裂纹的产生会导致加工亚表面出现损伤,影响工件的表面/亚表面质量、使用寿命.

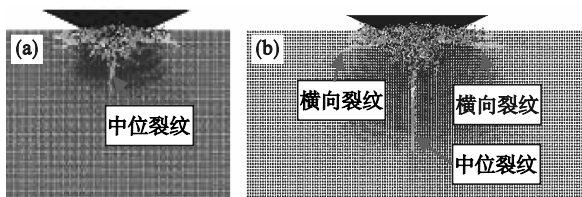


图 3 磨粒压入 SiC 陶瓷表面横向裂纹和中位裂纹产生情况
Fig. 3 Generation of transverse and median cracks when the abrasives press into SiC ceramic surface
(a)— $t=0.02 \mu\text{s}$; (b)— $t=0.04 \mu\text{s}$.

2.2 SiC 陶瓷的磨削去除机理

2.2.1 v_s 对 SiC 陶瓷磨削去除机理的影响

图 4 为 v_w 和 a_p 不变,不同 v_s 的磨削表面,从图中可以清晰地看出材料表面的磨削加工方向.当 v_s 为 $2\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,可以观察到 SiC 陶瓷表面存在很多较为明显的由材料剥落产生的凹坑.凹坑的形成是由于磨粒对材料表面施加力的过程中在材料内部产生横向裂纹,横向裂纹不断向材料近表面区域延伸扩展,最终与表面贯通导致材料剥落.并且可以发现加工表面存在着垂直于磨削方向和平行于磨削方向的两种裂纹,对比可知平行于磨削方向的裂纹较长,其产生原因为尖锐的磨粒划擦材料表面.通过观察发现,由材料剥落产生的凹坑内部和边缘比较粗糙,凹坑附近存在着很多细小裂纹.这是由于材料受到尖锐磨粒的挤压和冲击而脱落,很多 SiC 晶粒或块体从表面脱离,并且这种由于冲击而脱落的方式通常会导导致这些凹坑面积较大.相对较小并且平滑的凹坑产生原因可能是磨削过程中磨削区产生大量的热无法散开,这就导致了材料发生热软化反应,进而提高了材料塑性变形能力,材料的脆性断裂得到一定的延缓,所以材料去除产生的凹坑较小且平滑.当 v_s 为 $17\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,通过观察图 4b 可以发现材料表面存在着沿磨削方向塑性的犁沟状条纹,并且在其边缘存在着由剥落产生的凹坑,说明此时材料表面塑性耕犁区域较多.

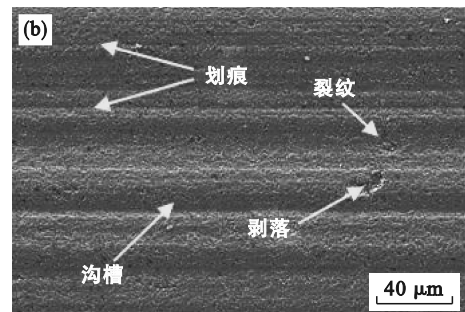
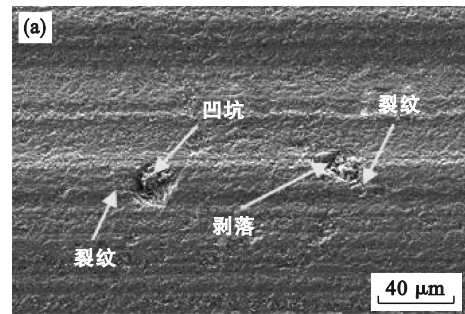


图 4 v_s 不同时的磨削表面
Fig. 4 Grinding surface at different v_s
(a)— $v_s=2\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; (b)— $v_s=17\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.

通过对比两种 v_s 下的磨削表面,可以发现当 v_s 较小时材料脱落产生的凹坑缺陷区域较多,且凹坑面积和深度都较大,剥落现象非常明显,导致磨削方向上的加工条纹无法清晰辨认,此时材料以脆性断裂去除为主.当 v_s 较大时,材料表面产生的剥落区域数量较少,但是能够清晰地观察到较多磨削方向上的犁沟状纹理,说明此时表面产生的塑性耕犁区域较多,材料以塑性去除为主. v_s 的增大会导致磨削过程中的工件表面材料逐渐由发生脆性断裂、产生脆性剥落向产生塑性变形的过程转变.而 SiC 陶瓷磨削去除方式由脆性去除向塑性去除转变的过程会使得加工表面平整度提高,表面质量得到改善.

2.2.2 v_w 对 SiC 陶瓷磨削去除机理的影响

图 5 为 v_s 和 a_p 不变、 v_w 取值为 $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $650 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的磨削表面.当 v_w 为 $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,由图 5a 可以明显观察到材料表面存在着多条相互平行的塑性沟槽,并且这些耕犁条纹深度较浅.同时还可以发现表面由剥落产生的凹坑缺陷较少,且凹坑面积和深度都较小.说明以当前参数进行磨削时材料表面产生的塑性去除区域较多,而脆性去除区域较少.当 v_w 增加至 $650 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,通过观察图 5b 可以发现材料表面凹坑缺陷区域明显增多,剥落区域面积和深度都变大,且凹坑边缘存在着很多细小裂纹.表面平行于磨削方向的隆起状沟纹变得模糊,较多剥落区域伴随在沟纹边缘,表明以当前磨削参数进行加工时材料以脆性断裂去除为主.

通过以上分析可以得出结论,当提高 v_w 时材料表面隆起状纹理难以清晰辨认,产生的塑性耕犁区域明显减少,而脆性断裂区域明显增多.表明 v_w 的增大会导致材料加工由塑性变形向脆性断裂转变,去除方式由塑性去除过渡到脆性断裂去除.

2.2.3 a_p 对 SiC 陶瓷磨削去除机理的影响

图 6 为 v_s 和 v_w 不变, a_p 为 $10 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$ 的磨削表面.观察图 6a 可知,当 a_p 为 $10 \mu\text{m}$ 时,表面存在着一些磨粒磨削后的划痕和沟槽,且加工纹理十分明显.同时可以发现材料剥落导致的凹坑缺陷较少,且缺陷区域面积和深度也较小,表明此时材料在加工过程中以塑性去除方式为主.由于磨削加工实际上是多磨粒综合作用的过程,当单颗磨粒受到的平均载荷低于临界值时,材料就会发生塑性变形.这种现象产生的原因是金刚石砂轮以一定转速加工时,磨粒与材料表面会发生周

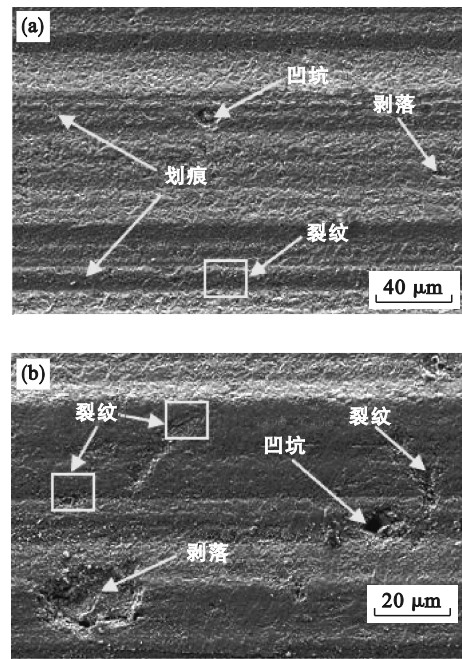


图 5 v_w 不同时的磨削表面
Fig. 5 Grinding surface at different v_w
(a)— $v_w=50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; (b)— $v_w=650 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

期性的挤压和摩擦,长时间的剧烈碰撞会导致磨粒的磨损或破碎,导致单颗磨粒受到的平均载荷减小,最终导致塑性变形.当 a_p 增大到 $40 \mu\text{m}$,观察图 6b 可以发现材料剥落区域增多,凹坑面积扩大,材料表面脆性断裂区域较多.其产生原因为材料受到的切削载荷达到临界值时,材料内部会产生裂纹.当 a_p 较大时, SiC 陶瓷受到磨粒的切削载荷也较大,会使产生的裂纹进一步扩展,从而使材料产生脆性断裂,最终 SiC 陶瓷以块状形态从材料表面脱离出来.当磨削深度大于临界磨削深度时, SiC 陶瓷就会由塑性变形转变为脆性断裂.而试验中磨削深度远超过临界磨削深度值,所以此加工参数下,脆性断裂是 SiC 陶瓷的主要去除方式.通过以上分析可以得出:当磨削深度较小时,材料表面塑性隆起状纹理较多, SiC 陶瓷主要以塑性去除的方式成屑.而当单颗磨粒的磨削厚度超过 SiC 陶瓷的脆-塑转变临界磨削深度时, SiC 陶瓷的去除方式会由塑性去除向脆性断裂去除转变,此时材料加工脆性断裂就会占主导地位.

2.3 磨削参数对 SiC 陶瓷磨削力的影响

2.3.1 v_s 对 SiC 陶瓷磨削力的影响

图 7 为不同 v_s 下的 SiC 陶瓷法向磨削力 (F_n) 和切向磨削力 (F_t) 的变化趋势.当 v_w 和 a_p 不变, v_s 由 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $17000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, SiC 陶瓷的法向磨削力由 30.93 N 降低到 21.87 N ,切向

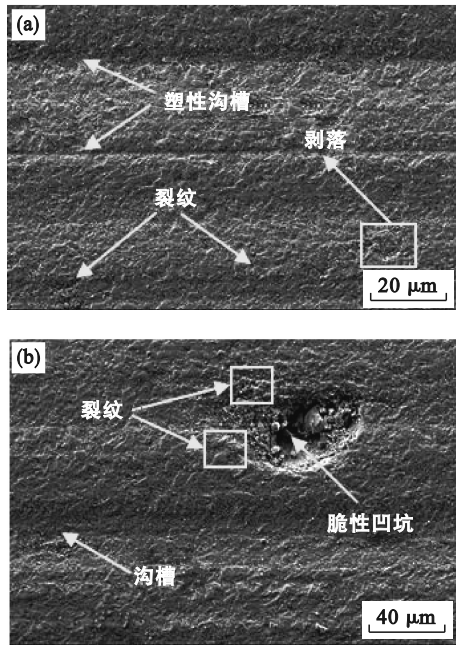


图 6 a_p 不同时的磨削表面
Fig. 6 Grinding surface at different a_p
(a)— $a_p=10 \mu\text{m}$; (b)— $a_p=40 \mu\text{m}$.

磨削力由 3.31 N 降低到 2.42 N. 随着 v_s 的增大, 2 种材料的法向磨削力和切向磨削力都减小. 出现此现象的原因是 v_s 的增大会使得砂轮表面单颗磨粒切削厚度减小, 单颗磨粒的切削力减小, 最终整体磨削力呈下降的趋势. 此外, v_s 的增大会导致工件材料磨削区的局部温度升高, 当加工产生的温度超过材料临界淬火点时, 工件材料就会产生热软化效应, 所以磨削材料需要的磨削力就会减小. 同时适当的磨削温度的升高能够增大 SiC 陶瓷的断裂韧性, SiC 陶瓷塑性去除比例增加, 单颗磨粒所受切削力减小, 磨削力会显著降低. 其次, v_s 的不断增大在一定程度上能够降低砂轮表面金刚石颗粒与 SiC 陶瓷间的摩擦系数, 导致磨削加工受到的阻力减小, 从而使磨削力降低.

通过观察 SiC 陶瓷法向和切向磨削力的变化曲线能够发现, F_n 明显大于 F_t . 这表明 F_n 在 SiC 陶瓷的磨削加工过程中起主要切削作用. 根据压痕断裂力学可知, 磨粒对材料施加的磨削力增大会导致横向裂纹和中位裂纹的产生. 在 F_n 的作用下中位裂纹发生显著变化, F_n 的增加会使得中位裂纹沿纵向不断扩展延伸, 导致了材料脆性断裂, 表面/亚表面出现损伤. 而 F_t 主要促进横向裂纹的偏转和扩展, F_t 的增加会导致横向裂纹尺寸变大, 当横向裂纹不断向材料近表面区域扩展直至与表面贯通时就会导致材料发生剥落, 因此会出现磨削力增加、表面脆性断裂增多的现象.

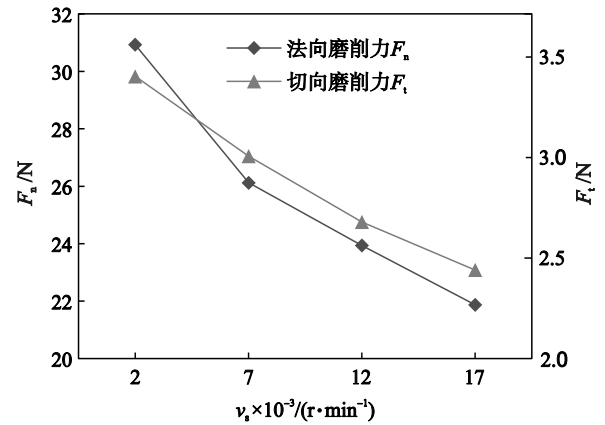


图 7 v_s 对 F_n 和 F_t 的影响
Fig. 7 Effect of v_s on F_n and F_t

2.3.2 v_w 对 SiC 陶瓷磨削力的影响

图 8 为不同 v_w 下 SiC 陶瓷法向磨削力和切向磨削力的变化曲线. 当 v_s 和 a_p 不变, v_w 从 $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $650 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, SiC 陶瓷的法向磨削力从 11.22 N 增加到 37.85 N, 径向磨削力从 2.5 N 增加到 5.0 N. 这表明 v_w 的增加导致 2 种材料法向磨削力和切向磨削力都呈现增大的趋势. 此现象产生的原因是当 v_w 较小时, 单颗磨粒的最大未变形切削厚度小于 SiC 陶瓷磨削过程中发生脆-塑转变的临界深度, 此时 SiC 陶瓷以塑性变形为主, F_n 和 F_t 均很小. v_w 的增大会导致单颗磨粒的切削厚度增加, 材料发生脆性断裂区域增多, 单颗磨粒受力增大, 法向与切向磨削力增大.

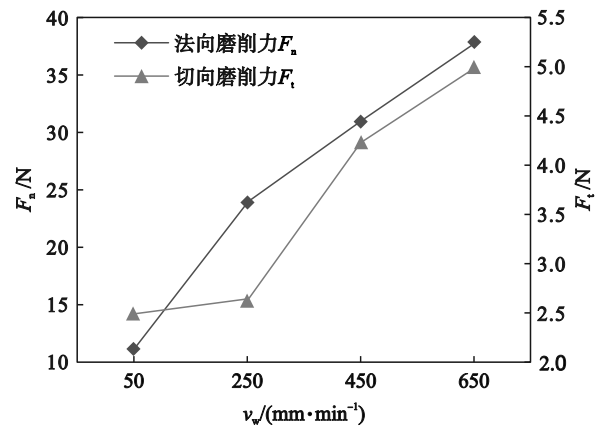


图 8 v_w 对 F_n 和 F_t 的影响
Fig. 8 Effect of v_w on F_n and F_t

2.3.3 a_p 对 SiC 陶瓷磨削力的影响

图 9 所示为不同 a_p 下 SiC 陶瓷法向磨削力和切向磨削力的变化情况. 当 v_s 与 v_w 不变, a_p 从 $10 \mu\text{m}$ 增加到 $40 \mu\text{m}$ 时, SiC 陶瓷的法向磨削力从 19.66 N 增加到 28.82 N, 切向磨削力从 2.5 N 增

加到 3.4 N. 这表明 F_n 和 F_t 随 a_p 的增大而增大. 此现象的原因是 a_p 的增大会导致磨粒与材料的接触弧长变大, 而且单颗磨粒磨削厚度增大, 进而导致了磨粒刮擦产生的材料剥落部分体积增大, 磨削功耗增加, 磨削力增大.

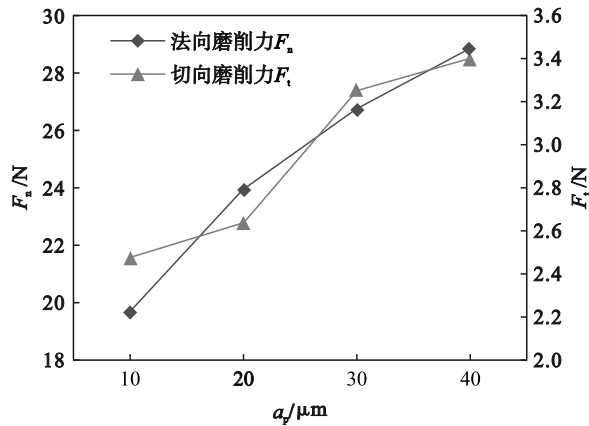


图9 a_p 对 F_n 和 F_t 的影响

Fig. 9 Effect of a_p on F_n and F_t

3 结 论

1) 基于 SPH 法对 SiC 陶瓷进行仿真模拟, 结果表明, 材料脆性去除时, 工件内部应力场导致横向裂纹的产生, 横向裂纹会向近工件表面区域偏转和扩展, 当横向裂纹扩展至材料表面形成封闭之后就会导致材料发生脆性断裂.

2) SiC 陶瓷的磨削去除机理为横向裂纹扩展导致的脆性断裂去除以及部分塑性去除; 并且磨削参数不同, 其脆性断裂和塑性变形所占比重不同. 当 v_w 和 a_p 不变时, 随着 v_s 的增大, 表面产生的剥落区域数量较少, 能够清晰地观察到较多磨削方向上的犁沟状纹理表面, 由脆性去除向塑性去除转变, 加工后的表面质量得到改善; v_s 和 a_p 不变, v_w 增大会导致材料由塑性去除向脆性去除转变, 表面隆起状纹理难以清晰辨认, 加工表面平整度变差; v_s 和 v_w 不变, 当 a_p 增大至超过脆-塑转变临界磨削深度时, SiC 陶瓷工件表面剥落区域增多, 凹坑面积增大.

3) SiC 陶瓷磨削过程中 $F_n > F_t$; 随着 v_s 由 $2\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $17\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, F_n 和 F_t 分别降低了 29.3% 和 18.0%; 随着 v_w 从 $50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $650\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, F_n 和 F_t 分别增加了 58.1% 和 100.1%; a_p 从 $10\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $40\text{ }\mu\text{m}$, F_n 和 F_t 分别增加了 46.6% 和 37.4%.

参考文献:

- [1] Dai C W, Yin Z, Wang P, et al. Analysis on ground surface in ultrasonic face grinding of silicon carbide (SiC) ceramic with minor vibration amplitude [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(15): 21959-21968.
- [2] 戴剑博, 苏宏华, 王忠宾, 等. 多晶碳化硅陶瓷磨削裂纹损伤形成机理研究 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58(13): 307-320. (Dai Jian-bo, Su Hong-hua, Wang Zhong-bin, et al. Research on the crack damage formation mechanisms of polycrystalline silicon carbide ceramics in grinding process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(13): 307-320.)
- [3] Meng B B, Zhang F H, Li Z P. Deformation and removal characteristics in nanoscratching of 6H-SiC with Berkovich indenter [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, 31: 160-165.
- [4] 于腾飞, 苏宏华, 戴剑博, 等. 单颗磨粒磨削碳化硅陶瓷磨削力与比能研究 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(1): 120-125. (Yu Teng-fei, Su Hong-hua, Dai Jian-bo, et al. Grinding force and specific grinding energy in process of grinding SiC with single grit [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(1): 120-125.)
- [5] Cao J G, Wu Y B, Li J Y, et al. Study on the material removal process in ultrasonic - assisted grinding of SiC ceramics using smooth particle hydrodynamic (SPH) method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(5): 985-994.
- [6] Zheng Z D, Huang K, Lin C T, et al. An analytical force and energy model for ductile-brittle transition in ultra-precision grinding of brittle materials [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 220: 107107.
- [7] Zhu D H, Yan S J, Li B Z. Single-grit modeling and simulation of crack initiation and propagation in SiC grinding using maximum undeformed chip thickness [J]. *Computational Materials Science*, 2014, 92: 13-21.
- [8] 刘瑞虎, 郭磊, 刘永胜, 等. 基于 SPH 方法的碳化硅材料单颗磨粒磨削仿真 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022(5): 55-58. (Liu Rui-hu, Guo Lei, Liu Yong-sheng, et al. Simulation of single abrasive grinding of silicon carbide material based on SPH method [J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2022(5): 55-58.)
- [9] 谢桂芝, 尚振涛, 盛晓敏, 等. 工程陶瓷高速深磨磨削力模型的研究 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(11): 169-176. (Xie Gui-zhi, Shang Zhen-tao, Sheng Xiao-min, et al. Grinding force modeling for high-speed deep grinding of engineering ceramics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(11): 169-176.)
- [10] Gong Y D, Qu S S, Yang Y Y, et al. Some observations in grinding SiC and silicon carbide ceramic matrix composite material [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(5): 3175-3186.
- [11] Wu C J, Li B Z, Yang J G, et al. Prediction of grinding force for brittle materials considering co-existing of ductility and brittleness [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(5): 1967-1975.
- [12] Guo Y, Liu M H, Li C L. Modeling and experimental investigation on grinding force for advanced ceramics with different removal modes [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(11): 5483-5495.