

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.01.017

单颗磨粒磨削碳化硅陶瓷磨削力与比能研究

于腾飞 苏宏华 戴剑博 周文博

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

摘要:为探索磨削速度和单颗磨粒最大未变形切厚对碳化硅陶瓷高速磨削材料去除过程的影响规律,进行了切向进给单颗磨粒高速磨削试验,研究了磨削力、磨削比能与磨削速度以及单颗磨粒切厚的关系。研究表明,单颗磨粒切厚为 0.03 和 1 μm 时,磨削力和磨削比能均随着速度的增加而减小,而当切厚为 0.3 μm 时,磨削力和磨削比能随着磨削速度先增加后减小,磨削速度 80 m/s 为其转折点。磨削力随着单颗磨粒切厚的增大整体上呈上升趋势,但是当切厚小于某一临界值时,磨削力变化并不明显,磨削比能却急剧降低,而且磨削速度提高,该临界值变大。因此,磨削速度的提高有利于降低磨削力和磨削比能,适当增加单颗磨粒未变形切厚并不会恶化加工质量。

关键词:磨削力;磨削比能;磨削速度;单颗磨粒最大未变形切厚;碳化硅陶瓷

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)01-0120-06

Grinding Force and Specific Grinding Energy in Process of Grinding SiC with Single Grit

YU Tengfei, SU Honghua, DAI Jianbo, ZHOU Wenbo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To explore the influence of grinding speed and maximum undeformed chip thickness (M-UCT) on material removal mechanisms in high-speed grinding process, a single grit grinding experiment is carried out on silicon carbide (SiC) ceramics with tangential infeed grinding method. The grinding force and the specific grinding energy are analyzed. The results show that the grinding force and the specific grinding energy tend to decrease with the increase of grinding speed at M-UCT of 0.03 and 1 μm . However, when M-UCT is 0.3 μm , the grinding force and the specific grinding energy firstly increase and then decrease as the grinding speed rises, and 80 m/s is the turning point. The grinding force shows the periodic growth with the gradually increasing M-UCT. When the M-UCT is less than a critical value, the grinding force varies slowly. Nevertheless, the specific grinding energy declines quickly. The critical M-UCT value increases with the increase of grinding speed. High speed grinding can significantly reduce the grinding force and the specific grinding energy, and appropriate increment of M-UCT can not worsen the grinding quality.

Key words: grinding force; specific grinding energy; grinding speed; maximum undeformed chip thickness; SiC ceramics

基金项目:国家自然科学基金(52175231)资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20160522)资助项目。

收稿日期:2017-09-30;**修订日期:**2017-12-26

通信作者:苏宏华,男,教授,博士生导师,E-mail:shh@nuaa.edu.cn。

引用格式: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 Tengfei, SU Honghua, DAI Jianbo, 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.

碳化硅陶瓷因为具有良好的热稳定性、耐磨性、耐腐蚀性、高硬度以及低的膨胀系数等优越性能而被广泛应用于航空航天等工程领域^[1]。然而,碳化硅陶瓷的高脆性导致其在磨削加工中呈现出磨削力比大、表面质量不易控制、磨削加工性差的特点,限制了其应用范围^[2]。因此,研究碳化硅陶瓷高速磨削下的材料去除机理对实现其高效低损伤的加工目标具有重要意义。高速磨削是目前陶瓷材料精密加工的有效方法。HUANG 等^[3]对氮化硅陶瓷进行磨削实验,发现磨削过程中材料以塑性去除方式为主时,提高砂轮线速度会改善磨削表面质量。谢桂芝等^[4-5]对氧化锆、氮化硅和氧化铝 3 种陶瓷材料进行了高效深磨试验研究,结果表明,砂轮线速度由 40 m/s 提高至 160 m/s 可明显地增加材料的塑性去除比例。然而,传统上对工程陶瓷磨削速度效应的研究以整个砂轮磨削实验为主,砂轮上所有动态有效磨粒单颗磨粒未变形切厚在一定范围内分布,缺少一致性^[6]。因单颗磨粒在磨削过程中的磨削痕迹不受其他磨粒的影响,单颗磨粒未变形切厚可控,从而成为研究磨削机理的有效手段^[7]。冯宝富^[8]等将单颗磨粒粘接在特制的螺栓头上进行高速磨削试验,发现提高磨削速度有利于降低磨削比能,高速条件下剪切区材料软化效果增强。田霖^[9]选择典型难加工材料高温合金 GH4169 进行了单颗磨粒高速超高速磨削试验,定量分析了速度效应对临界成屑厚度的影响规律,试验结果表明,砂轮线速度的变化引起了材料加工机理的变化,具体变现为材料磨削痕迹主要特征的改变,以及由此引起的临界成屑厚度的改变,速度的提高使得临界成屑厚度呈现先减小后增大的趋势。为揭示磨削速度和单颗磨粒切厚对磨削力与磨削比能的影响规律,进一步认识碳化硅陶瓷高速磨削时材料去除机理的转变行为,本文对碳化硅陶瓷进行了切向进给单颗磨粒高速磨削试验,通过对磨削力、磨削比能变化规律的分析,明确磨削速度和单颗磨粒切厚对材料去除方式的转变影响。

1 单颗磨粒切厚和磨削比能

一个磨刃的未变形切屑厚度为作用在磨粒上的磨削力的大小、磨削比能的大小和已加工表面的粗糙度,单颗磨粒最大未变形切厚公式为^[10]

$$a_{g\max} = 2\lambda' \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \quad (1)$$

式中: v_s 为砂轮线速度, v_w 为工作台进给速度, a_p 为磨削深度, d_s 为砂轮直径, λ' 类似于砂轮磨削时砂轮表面的有效磨粒间距,在单颗磨粒磨削过程中,有 $\lambda' = \pi \cdot d_s$ 。工作台切向进给进行单颗磨粒

磨削示意如图 1 所示。根据磨削运动几何学及运动学知识可知:磨削过程中砂轮上一颗磨刃相对于工件的运动轨迹为砂轮圆周运动与工件进给运动两者的复合运动所形成的摆线轨迹^[11],如图 2 所示。令 s 表示单颗切刃相邻两次切削过程中的工件平移量,其表达式为工件进给速度 v_w 乘以相邻两次切削时间(λ'/v_s)的积,即

$$s = \frac{\lambda' v_w}{v_s} \quad (2)$$

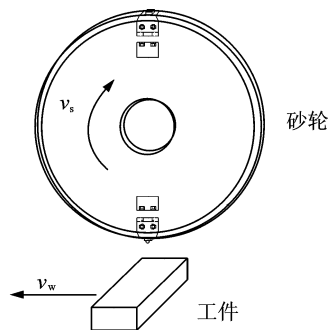


图 1 切向进给单颗磨粒磨削示意

Fig. 1 Single grit grinding of tangential feed

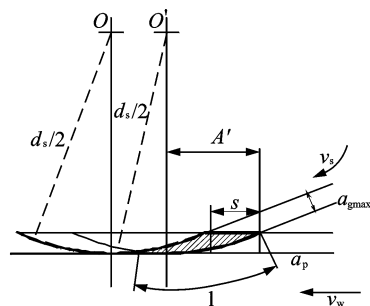


图 2 单颗磨粒磨削试验运动轨迹分析

Fig. 2 Trajectory analysis of single grit grinding

令 A' 表示磨刃切入点磨刃切入工件最低点的时间间隔内工件平移量,其表达式为

$$A' = \sqrt{a_p(d_s + a_p)} \quad (3)$$

为了单颗磨粒的运动轨迹更接近实际,使单颗磨粒磨削轨迹形成的未变形切屑形状为楔形条状,必须满足 s 远远小于 A' ,因此有

$$v_w \ll \frac{\sqrt{a_p d_s - a_p^2}}{\pi d_s} v_s \quad (4)$$

在工程陶瓷类硬脆材料磨削过程中,磨削比能是综合反映材料的去除方式的主要指标^[12]。磨削比能是磨削过程中去除单位体积工件材料所消耗的能量,能量是决定材料去除方式的关键因素之一,因此磨削比能是研究碳化硅陶瓷磨削机理的重要参数。现有的磨削比能计算模型主要针对对整个砂轮磨削比能的计算,没有见到单颗磨粒砂轮磨削比能计算模型的报导。根据磨削比能的定义,本文

单颗磨粒砂轮磨削比能计算公式为

$$e_s = \frac{W}{V} = \frac{F_{gt} \cdot l_s}{\frac{1}{2} \cdot l_s \cdot a_{gmax} \cdot a_e} = \frac{2F_{gt}}{a_{gmax} \cdot a_e} \quad (5)$$

式中: W 为磨粒单次切削所做的功, V 为磨粒单次切削行程切屑体积, a_{gmax} 为最大未变形切厚, $a_e = 0.3 \text{ mm}$ 为未变形切屑宽度。本试验中, 单颗磨粒最大切厚 a_{gmax} 不超过 $1 \mu\text{m}$, 磨削弧长 $l_s = 2.793 \text{ mm}$, l_s 远远大于 a_{gmax} , 被去除材料形状呈现为狭长的楔形, 近似于三角形, 以此来计算被去除材料的体积。

2 单颗磨粒磨削试验条件

试验在高速平面精密磨床 (PROFIMAT MT 408) 上进行, 机床主轴功率为 45 kW , 主轴最高转速可达 $8\ 000 \text{ r/min}$, 工作台最大进给速度为 $25\ 000 \text{ mm/min}$, 冷却液出口压力 1.5 MPa , 采用 M5000 型动平衡系统对砂轮进行在线动平衡。

图 3 为能够实现高速旋转的单颗磨粒磨削砂轮装置及钎焊单颗磨粒形貌, v_s 为砂轮线速度, v_w 为工件进给速度。为保证磨削条件的一致性, 试验中采用的是单颗磨粒晶形规则的金金刚石磨粒, 粒度号为 #35/40。加工样件碳化硅陶瓷的尺寸规格为 $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 材料力学性能如表 1 所示。测量装置主要有三向压电式测力仪 (KISTLER9265B), 主要进行单颗磨粒切向磨削力 F_{gt} 和单颗磨粒法向磨削力 F_{gn} 的测量。

磨削速度变化和单颗磨粒切厚变化对磨削过程影响的磨削试验工艺参数分别如表 2, 3 所示。

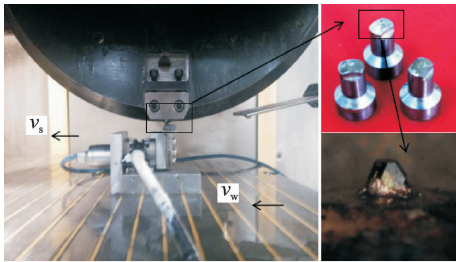


图 3 钎焊单颗磨粒及磨削装置图

Fig. 3 Brazed single grit and grinding equipment

表 1 碳化硅陶瓷的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of SiC ceramics

物理力学性能	SiC
密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	3.2
硬度 H / MPa	2.3×10^4
弹性模量 E / MPa	4.1×10^5
断裂韧性 $K_{IC} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	3.2

表 2 磨削速度变化的磨削工艺参数

Tab. 2 Grinding parameters with changing grinding speed

试验条件	参数
砂轮线速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	20, 40, 68, 80, 100, 120, 140, 160
磨削深度 $a_p / \mu\text{m}$	20
砂轮直径 d_s / mm	392
单颗磨粒切厚 $a_{gmax} / \mu\text{m}$	0.03, 0.3, 1
冷却条件	干磨

表 3 单颗磨粒切厚变化的磨削工艺参数

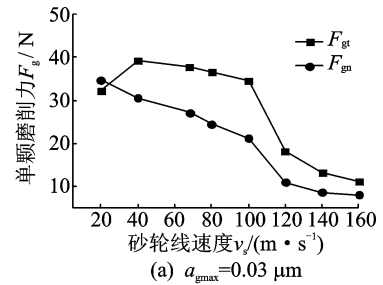
Tab. 3 Grinding parameters with changing UCT

试验条件	参数
砂轮线速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	20, 80, 120
磨削深度 $a_p / \mu\text{m}$	20
砂轮直径 d_s / mm	392
单颗磨粒切厚 $a_{gmax} / \mu\text{m}$	0.02, 0.03, 0.05, 0.08, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 2, 3
冷却条件	干磨

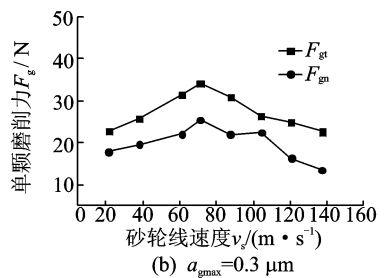
3 试验结果分析

3.1 磨削速度对磨削力与磨削比能的影响

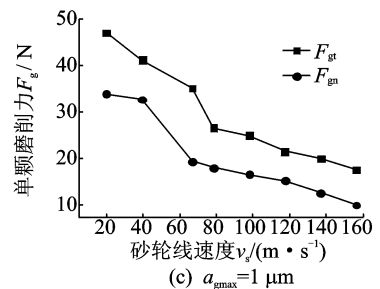
图 4 是在不同单颗磨粒未变形切厚下 ($a_{gmax} = 0.03, 0.3$ 和 $1 \mu\text{m}$), 单颗磨粒磨削力随砂轮线速度的变化规律曲线。从图 4 可以看到, 磨削速度对



(a) $a_{gmax} = 0.03 \mu\text{m}$



(b) $a_{gmax} = 0.3 \mu\text{m}$



(c) $a_{gmax} = 1 \mu\text{m}$

图 4 磨削力与磨削速度的关系

Fig. 4 Relationship between the grinding force and grinding speed

磨削力有显著影响,不同单颗磨粒未变形切厚下影响规律不一样。当 $a_{gmax} = 0.03 \mu\text{m}$ 时,切向和法向磨削力随着磨削速度的增加整体上呈下降趋势,但是磨削速度在 $20 \sim 100 \text{ m/s}$ 范围内,切向磨削力下降比较缓慢,仅降低了 12.5% ;当磨削速度大于 100 m/s 时,切向力和法向力显著降低,分别降低了 70% 和 42.8% 。当单颗磨粒切厚为 $0.03 \mu\text{m}$ 时,磨削速度超过 100 m/s 时,材料的力学性能发生了显著变化,磨削力大幅降低,有利于实现延性域加工,降低亚表面损伤。当 $a_{gmax} = 0.3 \mu\text{m}$ 时,切向力和法向力均随着磨削速度从 20 m/s 增加到 80 m/s ,分别升高了 54.5% 和 41.2% ;当速度大于 80 m/s 时,磨削力开始降低。单颗磨粒未变形切厚为 $0.3 \mu\text{m}$ 时,磨削速度 80 m/s 为其临界速度,材料的加工性发生了变化。当单颗磨粒切厚为 $1 \mu\text{m}$ 时,磨削力随着磨削速度提高而降低,但切向力和法向力在 $20 \sim 80 \text{ m/s}$ 速度范围内磨削力变化斜率明显大于 $80 \sim 160 \text{ m/s}$ 速度范围磨削力变化斜率,即在低速范围内,磨削速度对磨削力影响更加显著。从以上分析可知,磨削速度对磨削力有显著影响,对于不同的单颗磨粒未变形切厚,磨削速度对磨削力影响规律也不同。磨削速度对磨削力的影响曲线表明,磨粒切入工件的难易程度发生了改变,当砂轮线速度大于 80 m/s 时,速度效应显著提高了碳化硅陶瓷磨削加工性,磨痕表面形貌的变化也印证了速度提高的优势,如图 5 所示。

结合测得的磨削力,根据式(5),得出磨削速度对磨削比能的影响规律,如图 6 所示。单颗磨粒切厚 $a_{gmax} = 0.03 \mu\text{m}$ 时磨削比能远大于单颗磨粒切厚为 $0.3 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 时的磨削比能。这是因为 $0.03 \mu\text{m}$ 远小于碳化硅陶瓷脆延转变临界切厚,材料完全以塑性方式去除,磨削速度的提高,磨削比能显著降低。研究表明,磨削过程绝大部分的能量都消耗在划擦和耕犁两个阶段,成屑过程所消耗的能量仅有 $1\% \sim 6\%$ [13]。磨削速度增加,磨粒动态切削锋利度增加,划擦和耕犁阶段缩短,消耗的总能量降低,这是磨削速度提高导致磨削比能降低的主要原因;然而在单颗磨粒切厚 $a_{gmax} = 0.3 \mu\text{m}$ 条件下,工件材料去除兼有延性去除和脆性去除两种方式,磨削速度在 $20 \sim 80 \text{ m/s}$ 范围内,磨削比能增加主要是原因随着速度的提升,材料塑性方式去除比例增加,脆性方式去除比例减小,进而磨削比能增加,但磨削速度在 $80 \sim 160 \text{ m/s}$ 范围内,磨削速度的增加导致划擦和耕犁阶段变短,从而导致磨削比能的降低;在单颗磨粒切厚 $a_{gmax} = 1 \mu\text{m}$ 时,磨削比能较小,且随着磨削速度的升高而降低,材料完全以脆性断裂方式去除,脆性断裂消耗能量要比延性去除消耗能小的多。

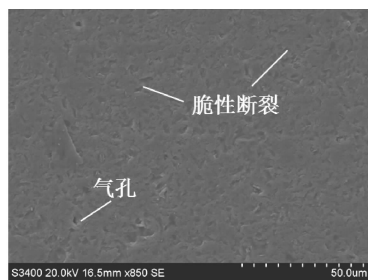
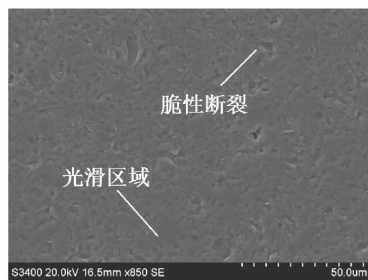
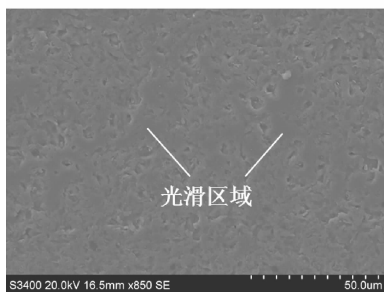
(a) $v_s = 20 \text{ m/s}$ (b) $v_s = 80 \text{ m/s}$ (c) $v_s = 160 \text{ m/s}$

图 5 $a_{gmax} = 0.3 \mu\text{m}$ 时不同磨削速度下的磨痕表面形貌
Fig. 5 Workpiece surface morphologies of different grinding speed at the M-UCT of $0.3 \mu\text{m}$

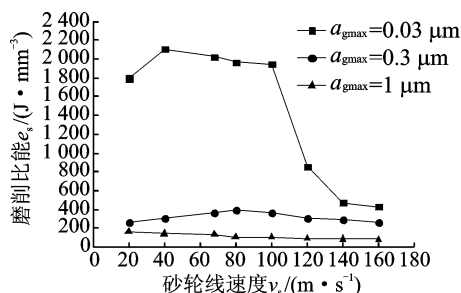


图 6 磨削比能与磨削速度的关系

Fig. 6 Relationship between the specific grinding energy and grinding speed

3.2 单颗磨粒切厚对磨削力与磨削比能的影响

图 7(a~c) 是磨削速度分别为 $20, 80$ 和 120 m/s 时,单颗磨粒磨削力随单颗磨粒切厚的变化规律曲线。从图中可以看到,磨削力随着单颗磨粒切厚的增加整体上是增大的。在磨削速度为 20 m/s 条件下,单颗磨粒切厚小于 $0.3 \mu\text{m}$ 时,单颗磨粒切厚对切向磨削力和法向磨削力影响并不明显,上下波动约为 15% ,但单颗磨粒切厚在 $0.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围内,磨削力随着单颗磨粒切厚增大而显著上升,切向和法向磨削力分别由 17.5 N 和 12 N 增

长到 46.4 N 和 34 N,增幅高达 180%,在单颗磨粒切厚大于 0.8 μm 后,磨削力增长趋于平缓;当磨削速度为 80 m/s 时,单颗磨粒切厚在 0.02~1 μm 范围内,切向和法向磨削力从 20 N 和 14 N 增长到 26 N 和 17 N,分别增长了 30%和 21.4%,单颗磨粒切厚超过 1 μm 后,磨削力随着单颗磨粒切厚迅速增加;当磨削速度为 120 m/s 时,在单颗磨粒切厚小于 0.5 μm 范围,切向和法向磨削力分别由 13 N 和 10.6 N 增长到 26 N 和 18 N,单颗磨粒切厚在 0.8~1 μm 范围内,法向力大于切向力。单颗磨粒切厚的增大,导致磨屑截面积增大,使得磨粒一次性去除体积增大,进而导致磨削力增加,然而随着单颗磨粒切厚的增加,磨削力并不是线性地升高,主要是因为单颗磨粒切厚逐渐增大过程中,存在着材料去除方式的转变,而且磨削速度对材料去除方式也有着重要的影响,使得磨削力随着切厚的增加呈阶段性变化。

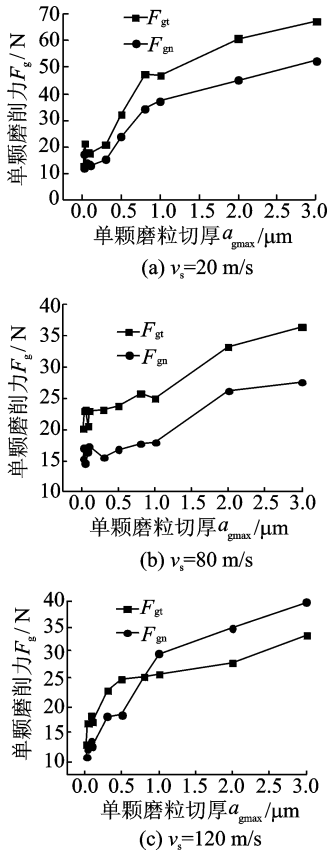


图7 磨削力与单颗磨粒切厚的关系

Fig. 7 Relationship between the grinding force and M-UCT

根据以上得到的单颗磨粒切向磨削力,由式(2)可得 3 个不同磨削速度下,磨削比能随单颗磨粒切厚变化而变化的曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,在不同磨削速度下,磨削比能随着单颗磨粒切厚的增大而急剧降低,当单颗磨粒切厚增大到一定值后,磨削比能变化区域平缓,磨削速度为 20, 80

和 120 m/s 条件下该临界单颗磨粒切厚分别为 0.3, 0.5 和 0.8 μm,在不同速度下,该临界单颗磨粒切厚不一致。究其原因,主要是因为单颗磨粒切厚很小的时候工程陶瓷材料更多的是以塑性方式变形为主,划擦、耕犁阶段较长,材料去除率极低,磨削比能非常大,随着单颗磨粒切厚增大,成屑阶段增加,划擦耕犁阶段缩短,磨削比能急剧下降,当单颗磨粒切厚增大到一定值后,材料去除方式逐渐由塑性去除转变到脆性去除,磨削比能降低速度减小,此后单颗磨粒切厚继续增大,直至材料完全以脆性断裂方式去除,磨削比能趋于稳定。图 9 为

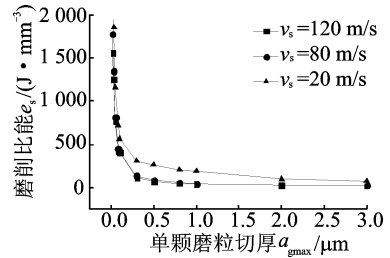


图8 磨削比能与单颗磨粒切厚的关系

Fig. 8 Relationship between the specific grinding energy and M-UCT

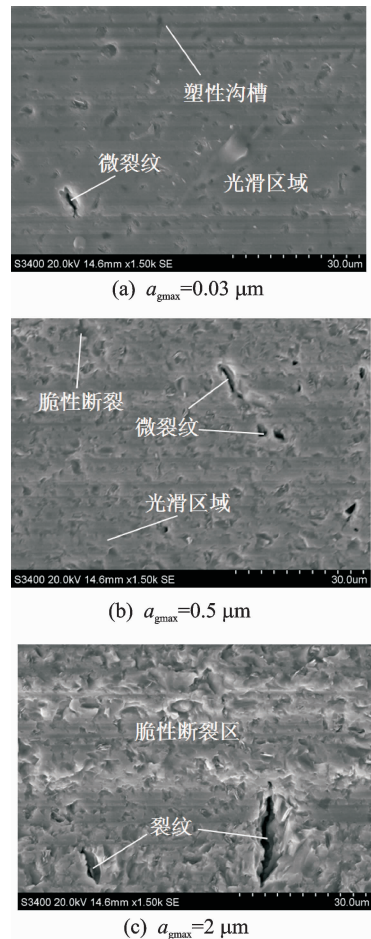


图9 $v_s = 20$ m/s 时不同单颗磨粒切厚下的磨痕表面形貌
 Fig. 9 Workpiece surface morphologies of different M-UCT at the grinding speed of 20 m/s

磨削速度 20 m/s 时,3 种单颗磨粒切厚的条件下磨削后的表面形貌,形貌的变化趋势与单颗磨粒切厚变化的关系与以上分析相吻合。

4 结束语

(1)对碳化硅陶瓷的磨削加工而言,磨削速度对磨削力和磨削比能有显著影响,磨削速度的增加可以有效降低磨削力和磨削比能。

(2)磨削力随着单颗磨粒切厚的增加整体上呈上升趋势,但由于材料去除方式和磨削速度的影响使得磨削力上升趋势呈阶段性变化。

(3)单颗磨粒切厚的增加使得磨削比能急剧降低,单颗磨粒切厚增大到临界值后开始趋于稳定,在不同磨削速度下,磨削比能发生变化时单颗磨粒切厚临界值不一致,磨削速度为 20,80,120 m/s 时临界单颗磨粒切厚分别为 0.3,0.5 和 0.8 μm 。

(4)随着单颗磨粒切厚的逐渐增大,材料去除塑性比例减小而脆性断裂比例增大。单颗磨粒切厚一定,当砂轮线速度大于 80 m/s 时,磨削速度的提高可以改善碳化硅陶瓷的磨削加工性。

参考文献:

[1] DING Kai, FU Yucan, SU Honghua, et al. Wear of diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71: 1929-1938.

[2] ANNE V G, PVENKATESWARA R. Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43: 1327-1336.

[3] HUANG Han, YIN Ling, ZHOU Libo. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141: 329-336.

[4] 谢桂芝,黄红武,黄含,等. 工程陶瓷高效深磨的试验研究[J]. 机械工程学报,2007,43(1):176-184.

XIE Guizhi, HUANG Hongwu, HUANG Han, et al. The experimental investigations of advanced ceramics in high efficiency deep grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 176-184.

[5] 谢桂芝,黄含,盛晓敏,等. 工程陶瓷高效深磨磨削力和损伤的研究[J]. 湖南大学大学学报,2008,35(5):26-30.

XIE Guizhi, HUANG Han, SHENG Xiaomin, et al. Investigation on the grinding force and the ground

damages in the high efficiency deep grinding of advanced ceramics[J]. Journal of Hunan University, 2008, 35(5): 26-30.

- [6] 张贝. 磨粒切厚可控的脆性材料延性域磨削基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- ZHANG Bei. Fundamental research on ductile regime grinding of brittle materials with controllable undeformed chip thickness of grains[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [7] OHBUCHI Y, MATSUO T. Force and chip formation in single-grit orthogonal cutting with shaped CBN and diamond grains[J]. Annals of CIRP, 1991, 40: 327-329.
- [8] 冯宝富,赵恒华,蔡光起,等. 高速单颗磨粒磨削机理的研究[J]. 东北大学学报,2002,23(5):470-473.
- FENG Baofu, ZHAO Henghua, CAI Guangqi, et al. Research on high speed grinding experiments with single-grit[J]. Journal of Northeastern University, 2002, 23(5): 470-473.
- [9] 田霖,傅玉灿,杨路,等. 基于速度效应的高温合金高速超高速磨削成屑过程及磨削力研究[J]. 机械工程学报,2013,49(9):169-177.
- TIAN Lin, FU Yucan, YANG Lu, et al. Research on ultra-high speed grinding process and grinding force of super alloy based on velocity effect[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9): 169-177.
- [10] 李伯民,赵波. 现代磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003:12-15.
- LI Bomini, ZHAO Bo. Modern grinding technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003: 12-25.
- [11] 田霖. 基于磨粒有序排布砂轮的高速磨削基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- TIAN Lin. Fundamental research on the high speed grinding with regular abrasive distribution wheel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [12] HWANG T W, EVANS C J, MALKIN S. High speed grinding of silicon nitride with electroplated diamond wheels[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122(2): 32-50.
- [13] 李曙生. 新型单层钎焊金刚石砂轮磨削工程陶瓷的基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- LI Shusheng. Research on grinding of engineering ceramics with innovative monolayer brazed diamond wheels[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.

