DOI: 10.3901/JME.2019.01.225

超声振动对单颗金刚石工具划擦 RB-SiC 材料去除行为的影响*

郑非非 董志刚 张嘉桐 刘津廷 康仁科
(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要: 超声辅助磨削在硬脆材料加工领域的诸多优势已被广泛认可, 研究超声辅助磨削机理对于促进超声辅助磨削工艺技术的应用有重要价值。通过单颗金刚石压头模拟砂轮磨粒, 在反应烧结碳化硅(Reaction bonded silicon carbide, RB-SiC)上进行超声振动辅助的划擦试验, 研究超声辅助磨削的材料去除行为。对比分析了划擦过程中不同超声振幅下的法向划擦力和切向划擦力的变化规律, 通过对划痕宽度、划痕深度和划痕截面积的统计分析研究了不同振幅下划痕的三维形貌特征。在综合分析划擦力、划痕微观形貌和金刚石压头磨损的基础上, 讨论了超声振动对硬脆材料加工的去除行为的影响。相比于常规的划擦试验, 引入超声振动作用后, 划擦力显著下降, 而划擦导致的材料去除体积显著增加。超声振动划擦中金刚石压头对工件表面独特的高频冲击作用及断续的能量输入方式被认为是导致上述现象的根本原因。

关键词: 超声辅助划擦; 单颗金刚石磨粒; 划擦力; 划痕形貌; 反应烧结碳化硅

中图分类号: TH161

Influence of Ultrasonic Vibration on Material Removal of Scratching on RB-SiC with Single Diamond Tool

ZHENG Feifei DONG Zhigang ZHANG Jiatong LIU Jinting KANG Renke
(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Ultrasonic assisted grinding (UAG) shows great advantages on the machining of hard and brittle materials. To enhance the application of UAG, it is important to investigate its basic mechanism. A single diamond tool is used to conduct ultrasonic assisted scratching (UAS) tests for the purpose of imitating the material removal behavior of a single grain on the grinding wheel. The nominal and tangential scratching forces are compared under different ultrasonic amplitudes. The topographical characteristics are analyzed, including the width, depth and cross section area of the scratched grooves. The influence of ultrasonic vibration on the material removal behavior is discussed based on the scratching force, topographical characteristics and tool wear. It is observed that the scratching force significantly descended while the material removal significantly ascended with the help of ultrasonic vibration. The high-frequency impact and the intermittent energy input are considered the cause of observed UAS features.

Key words: ultrasonic assisted scratching; single diamond; scratching force; scratch topography; RB-SiC

0 前言

随着空间光学技术的不断发展, 对大口径轻量化的空间反射镜的需求也日益增加。反应烧结碳化硅(Reaction bonded silicon carbide, RB-SiC)是制造空间反射镜的常用材料^[1], 它是一种硬度高、耐磨性强和

耐腐蚀性强的工程陶瓷材料。RB-SiC 作为典型的硬脆材料, 在进行传统加工(如磨削)时难以满足空间反射镜零件对精度、表面质量和加工效率的较高要求^[2-3]。传统磨削工艺易在零件表面引起表面和亚表面损伤, 导致制成的零件疲劳强度低, 而且制造成本较高^[4]。

在普通磨削加工的基础上, 于工件或磨具上施加超声振动来实现超声辅助磨削加工^[5], 能够有效改进加工效果。已有的研究表明, 与传统的磨削加工相比, 超声辅助磨削能够显著降低磨削力, 提高

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2015AA043402)、国家自然科学基金(51575085)和国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金资助项目。20180219 收到初稿, 20180701 收到修改稿

材料去除率,提高表面加工质量与加工精度,缓解砂轮堵塞现象,延长砂轮寿命等^[6-7]。超声辅助磨削对工程陶瓷材料加工过程的改善作用十分突出,然而,国内外学者在不同的振动形式、振动参数和加工参数下得到的效果有很大差异。为了掌握超声辅助磨削的规律,并给生产实践提供必要的指导,尚需完善对超声辅助磨削加工机理的基础性研究。

针对超声辅助磨削加工的去除机理,现有的一些研究手段包括:观察砂轮磨削后工件的表面形貌,测量磨削力,分析表面粗糙度和亚表面损伤等^[8-10],这些表征被用来探究加工参数对超声辅助磨削加工效果的影响规律。在上述研究的基础上,用简化的数学模型对加工过程进行描述,是很有价值的定量分析方法。目前很多学者使用 LAWN 等^[11]建立的压痕断裂力学模型来分析计算超声磨削中的磨削力及去除体积。如:PEI 等^[12]建立的钛合金超声旋转加工模型、CONG 等^[13]建立的超声辅助磨削模型、ZHANG 等^[14]建立的超声辅助磨削模型等等。这些研究多从单颗磨粒划擦作用入手建立模型,并以砂轮磨削来验证模型,没有从单颗粒划擦的角度对模型进行验证。单颗磨粒去除行为的研究能够为这些模型提供更直接的验证和试验支持。

使用附加超声振动的单点金刚石压头进行划痕试验是研究超声辅助磨削加工机理,尤其是研究单颗磨粒去除行为的有效方法^[15]。这种方法以模仿磨削过程中单颗磨粒的行为为手段,从微观尺度上探究超声振动在磨削加工过程中起到的作用。已有一些学者进行了相关的工作,如 ZHANG 等^[16-17]在蓝宝石和铝基碳化硅样件上进行了划擦速度为 0.4 m/s 的超声划擦试验,发现超声划擦的划擦力相比普通划擦较小。他们还对比划擦力比(也被称为摩擦系数)和残余应力进行了分析。CAO 等^[18]以 0.5 m/s 的划擦速度在 SiC 样件上进行了超声辅助划擦试验,通过分析切削力和划痕面积的比值,得出超声划擦能够提高去除效率的结论。ZHOU 等^[19]对超声划擦过程中的临界转变深度进行计算和预测,并在划擦速度为 0.000 17 m/s 的条件下在 BK7 玻璃上进行验证试验。

现有的超声划擦试验多集中在超声划擦和普通划擦试验现象的对比分析方面,对划擦过程中的参数影响关注较少。对不同振动条件下划擦力、划痕形貌和压头磨损的观测和分析会对超声辅助磨削机理的深入研究提供必要的参考。

本文采用金刚石压头模拟砂轮上的单颗磨粒,在 RB-SiC 材料上进行了划擦深度逐渐增加的普通划擦和超声振动划擦试验,对比研究了普通划擦和

超声振动划擦下、以及不同振幅的超声振动划擦下的划擦力、划痕表面形貌特征和压头的磨损规律,以便为超声辅助加工建模中单颗磨粒去除行为的描述提供试验基础。研究发现,超声振动对划擦过程中材料的去除有显著影响,尤其是在切入阶段呈现截然不同的塑性去除和断续敲击特征。结合划痕和压头的形貌观察,提出超声振动划擦在较小划擦力的条件下具备能量输入的明显优势,这是导致其材料去除模式差异的主要原因。

1 试验条件

目前,通过单颗粒划痕方法研究磨削加工机理的试验方案有三种,第一种是采用压痕/划痕仪做试验,划擦速度很低(如文献[19]的 10 mm/min)。第二种是将单颗磨粒固定在砂轮外圆柱面或者端面,通过砂轮主轴带动砂轮旋转实现高速划擦,这种方法可实现磨削速度下的划擦试验,但由于采用端面或者外圆砂轮,超声振动很难附加到砂轮上,难以实现超声振动辅助的划擦试验;第三种是将金刚石压头作为刀具夹持的机床刀柄上,以机床的进给速度作为划擦速度开展试验,这种方法的划擦速度较第二种方法低但远高于第一种方法,且在刀柄上容易附加超声振动,实现超声振动辅助划擦试验。结合三种划擦试验方法的特点,和本文的研究目的,选择了第三种试验方案。本文的试验在加工中心(US 70, DMG, 德国)上进行,利用其直线运动系统实现划擦过程。所选机床的横向进给速度为 0.1 m/min。加工中心外接了自研的超声振动系统,为划擦工具提供可调的超声振动。在划擦试验中,采用三向的压电式测力仪采集划擦力。

为了保证对切入点位置的控制,本文利用声发射仪器与测力仪进行对刀。具体实施方法是:控制压头缓慢下降直至出现超出阈值的声发射信号,将此点记录为工件零点。再于该零点上、下位置进行划擦,并采集力信号,对工件零点进行二次确定。

工件为尺寸分别是 30 mm×30 mm×10 mm 的 RB-SiC 样件,对其上表面做抛光处理。金刚石工具为洛氏压头,其切削部锥角 120°,刃圆半径 25 μm。压头与超声刀柄通过螺纹实现连接。为防止压头磨损给试验结果带来的误差,每支压头仅做一次划擦试验。

为实现切深的渐变,通过旋转机床工作台,使工件倾斜 0.05°,令划擦深度在划擦过程中由浅至深变化。每条划痕附加超声振幅依次为 0 μm、1.55 μm 和 3.1 μm,其他参数均保持一致。

图 1 金刚石压头

图 2 渐变切深划擦试验方案示意图

试验后的工件表面形貌数据由基恩士 VK-X260K 激光共聚焦显微镜获取, 并采用现代制造技术研究所自行研发的表面形貌处理软件进行分析。

2 超声振动对划擦力的影响

划擦过程中法向划擦力随划痕切入深度的变化规律图 3 所示。超声辅助划擦和普通划擦的法向划擦力都与切入深度呈一阶线性正相关, 线性拟合的 R^2 均在 95% 以上。加入超声振动之后, 法向力随切深的增加速度与无超声振动辅助的普通划擦相比有明显的下降, 其斜率的降幅为 70% 左右。从图 3 可以看出超声辅助作用大大降低了法向划擦力。其中, 当超声振幅为 3.1 μm 时, 划擦力的降幅比 1.55 μm 时还要稍大一些, 但并不十分突出。

图 3 法向划擦力随切入深度的变化规律

切向划擦力随划痕切入深度的变化规律图 4 所示, 与法向划擦力的变化规律类似, 切向划擦力与切入深度呈近似一阶线性正相关关系, 线性拟合的 R^2 均在 93% 以上。加入超声振动后, 切向力随切深的增长速度是无超声状态下的 70% 左右。超声振幅为 3.1 μm 时, 切向划擦力降幅大于超声振幅为 1.55 μm 时。

图 4 切向划擦力随切入深度的变化规律

图 5 给出了划擦过程中划擦力比(切向力和法向力比值)随切入深度的变化曲线。在有些文献中, 该值也被称为摩擦系数^[20-21]。从图中可以看出划擦力比基本在 0.1~0.5 之间波动, 且较之振幅为 1.55 μm 的划擦试验, 振幅增大到 3.1 μm 后的划擦试验中划擦力比值明显较小, 这与相关文献中的观测结果相近^[20]。进一步地, 从图 5 的试验结果可以看出随着切入深度加深, 划擦力比会不断上升, 而最后压头磨损后变大的刃圆半径会导致划擦力比稍稍下降。

图 5 不同超声振幅下的划擦力比

3 划痕尺寸分析

本文采用共聚焦显微镜获取划痕的三维形貌数据, 并分析形貌数据获得划痕的宽度、深度、面积等定量信息。如图 6 所示为划痕三维形貌数据的处理过程, 首先通过激光共聚焦显微镜对划痕的形貌进行扫描, 得到各点高度数据的矩阵信息。通过对边界的拟合计算, 将高度矩阵以原始平面为基准进行校正。本文采用根据数据相似度进行图像拼接的算法, 实现了同一条划痕多张照片、多组数据的拼接, 从而得到整条划痕的数据。图 7 所示为两幅划痕形貌照片拼接实例。根据确定的原始平面, 实现了对划痕沟槽、隆起和原始平面的区域辨识。

图6 数据处理过程

图7 图像处理过程示例

通过分析计算得到每条划痕的深度、宽度和截面积的统计数据,结果如图8~10所示。超声划擦试验的划痕深度、宽度和截面积明显大于普通划擦。随着接触时间的增加,切入深度逐渐加深,划痕深度和宽度也随之加深,但也有特例。超声振幅为 $3.1\mu\text{m}$ 的划痕尽管划痕深度符合上述规律,但是划痕宽度则不甚吻合。这主要是由于振幅较大时,切入阶

图8 划痕深度原始测量数据

图9 划痕宽度原始测量数据

图10 划痕截面积原始测量数据

段与切出阶段的最大切深差距较小,而振动输入的能量成为材料去除的主因,这与振幅较小或者无超声振动的情况有一定差异。

本文的划擦过程为由浅变深的切入过程,由于硬脆材料去除过程中的高度随机性,得到的数据有很大波动。为了方便三条划痕的对比和讨论,本文将接触时间 $t=0\sim 0.16\text{ s}$ (切入深度 $0\sim 16\mu\text{m}$)这一部分的形貌数据分为四个阶段,每段取其深度、宽度和截面积的平均值。在此基础上,探讨同一切削条件下振幅对划痕形貌的影响。

从图11可以推断,划擦时振幅较大(如为 $3.1\mu\text{m}$)时,划痕深度也较大,其增大趋势呈现正相关特征。划痕的宽度和划痕截面积与振幅的关系,也具备同样的规律,如图12、13所示。这暗示着超声振幅的增大使得系统输入的能量增加,并导致了材料去除率的增加^[22]。

图11 划痕深度随振幅的变化规律

图12 划痕宽度随振幅的变化规律

图 13 划痕截面积随振幅的变化规律

4 划痕的显微形貌分析

使用激光共聚焦显微镜观察划痕表面的显微形貌, 未引入超声振动辅助的普通划痕切入点附近的微观形貌如图 14 所示, 可以看出, 在划痕的切入阶段够观察到连续的耕犁痕迹, 此时的去除模式符合塑性域去除的特点^[23]。

图 14 普通划擦切入点附近划痕的微观形貌

超声振幅为 1.55 μm 和 3.1 μm 时, 超声划擦形成划痕的切入点附近的显微形貌分别如图 15、16 所示。在加入超声振动后, 切入点附近不能观察到

图 15 超声振幅为 1.55 μm 时划痕切入点附近的微观形貌

图 16 超声振幅为 3.1 μm 时划痕切入点附近的微观形貌

塑性域去除的特征, 取而代之的是沿划痕方向均匀分布的冲击坑以及两侧形成的微裂纹。测量可得图中每两个冲击坑之间的距离约为 4 μm, 这与根据设定的超声频率和划擦速度计算得到的金刚石压头两次超声振动冲击之间行进的距离相同。这说明, 在超声振动辅助划擦试验中, 在划擦深度较小时, 超声振动冲击是金刚石工具和工件之间作用导致材料去除的主要因素。

从图 15 可见, 当超声振幅较小时, 切入点附近可以观察到超声敲击形成的点状坑, 这与图 16 所示的大振幅条件下形成的划痕切入点附近形貌有所不同, 当超声振幅较大时, 超声敲击后两侧裂纹扩展为一条垂直于划擦方向的倾斜裂纹, 裂纹尺寸更大且有显著的微崩碎现象。这是由于在其他条件均一致的情况下, 大的超声振幅导致了更多的能量输入, 从而促进了裂纹的扩展和材料的去除。在金刚石压头振动冲击的作用下, 划痕底部以及两侧裂纹不断形成、扩展、相交, 是呈现硬脆材料特性的 RB-SiC 材料被去除的原因。随着切入深度的增加, 金刚石和 RB-SiC 工件接触时间变长, 相互作用加剧, 划擦力增加(如图 5 所示), 材料去除行为愈发明显, 渐渐形成如图 17 所示的月牙形片状崩碎。

图 17 超声辅助划擦形成的典型划痕形貌

振幅较大时, 由于压头较早与工件开始接触, 处于这一断续冲击阶段的划痕形貌就更长。随着划入深度的增加, 划入深度慢慢趋近并超过超声振幅(单边振幅), 在此之后金刚石压头和工件之间由断续接触转变为连续接触, 在划痕上能够观察到这一临界点, 如图 18 所示, 划痕的形貌于该点从断续敲击痕迹转变为大规模的破碎。经历该转变之后, 超声划擦过程除去输入了更多能量以外, 其划痕形貌与普通划擦类似, 均为脆性去除的典型形貌。

图 18 临界点处的划痕形貌

试验所用的 RB-SiC 材料为两相材料, 其中包含大尺寸的 SiC 颗粒, 以及由小颗粒 SiC 和游离硅构成的混合相^[24]。超声划擦划痕的材料去除在不同相内的表现不同。从本文试验观察到的划痕形貌可见, 混合相内材料一般以微破碎形式被去除, 而大规模的崩碎则更多出现在 SiC 颗粒中。这是因为, 由于游离硅和大量 SiC 小颗粒组成的混合相强度较高, 且混合相中多界面的存在阻止了裂纹的单向扩展, 从而更易以微破碎的形式被去除。磨削加工后的表面也观察到类似的现象, 在 SiC 颗粒大小约为 10 μm 的 RB-SiC 材料上, 崩碎往往始于 SiC 和 Si 相界面的微小缺陷^[21]。而在平均不到 1 μm 的小颗粒 SiC 和硅相构成的混合相上就不形成大规模崩碎的去除模式^[25]。

5 金刚石压头的磨损分析

为方便讨论, 将压头分别编号为 1、2、和 3 号。试验前后, 金刚石压头尖端部分的扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 观测图如图 19~21 所示。

表 1 压头使用基本信息

压头编号	超声振幅/μm
1	0
2	1.55
3	3.10

图 19 压头 1 磨损区域

图 20 压头 2 磨损区域

图 21 压头 3 磨损区域

在划擦过程中, 随着超声振幅增大, 压头尖端磨损区域的等效圆直径从 49.4 μm 增加到 52.1 μm, 再增加到 102.7 μm。超声冲击作用在增大了材料去除所需输入能量的同时, 被去除材料对金刚石工具的反作用也增大了。这些增加的能量可能是导致大振幅超声划擦中金刚石磨损加剧的重要原因。

经过无超声振动辅助的普通划擦试验, 在金刚石尖端可以观察到明显的粘附, 如图 19 所示。而在超声划擦后, 金刚石工具的尖端没有明显的粘附现象。超声振动的加入能够避免划擦过程中碎屑的附着。

6 结论

(1) 与普通划擦试验相比, 超声振动辅助划擦

可显著降低划擦力、提高材料去除率并避免切屑对压头的附着。随着划擦深度的逐渐增加, 划擦力近似呈一阶线性规律上升。引入超声振动后, 随着划痕深度的增加, 超声划痕划擦力上升的速度(斜率)较低, 仅约为普通划擦的 30% 左右; 在相同的实际切入深度下, 超声划痕的深度、宽度和截面积都远远大于普通划擦; 同一划擦条件下, 深度、宽度和截面积与振幅呈正相关关系。

(2) 超声划擦形成的划痕具有独特的形貌特征。在无超声辅助的普通划擦划痕切入点附近, 能够观察到塑性去除留下的耕犁痕迹。超声划擦划痕的切入位置处, 划痕表面出现规律性分布的敲击点, 其间距与单个超声振动周期对应的压头位移一致。随着划痕深度的增加, 超声划擦中材料去除模式从断续敲击转变为大规模崩碎。

(3) 与普通划擦相比, 超声振动辅助划擦试验在大幅减小划擦力的同时, 还通过超声振动的高频冲击作用增强了切削能量的输入, 加剧了微裂纹的扩展, 从而导致了更大的材料去除量和更严重的压头磨损。在较大的(3.1 μm)振幅下, 这一作用变得更为明显。

参 考 文 献

- [1] 王健. RBSiC 超声辅助磨削工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
WANG Jian. Study on the ultrasonic assisted grinding process of RBSiC[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [2] XIAO X, ZHENG K, LIAO W, et al. Study on cutting force model in ultrasonic vibration assisted side grinding of zirconia ceramics[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 104: 58-67.
- [3] CHEN J, FANG Q, LI P. Effect of grinding wheel spindle vibration on surface roughness and subsurface damage in brittle material grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 91: 12-23.
- [4] 梁志强, 王西彬, 吴勇波, 等. 超声振动辅助磨削技术的现状与新进展[J]. 兵工学报, 2010(11): 1530-1535.
LIANG Zhiqiang, WANG Xibin, WU Yongbo, et al. Status and progress of ultrasonic assisted grinding technique [J]. Acta Armamentarii, 2010(11): 1530-1535.
- [5] 张洪丽. 超声振动辅助磨削技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
ZHANG Hongli. Study on the technology and mechanism of ultrasonic vibration assisted grinding[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [6] SHEN J Y, WANG J Q, JIANG B, et al. Study on wear of diamond wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding ceramic[J]. Wear, 2015, 332-333: 788-793.
- [7] 康仁科, 马付建, 董志刚, 等. 难加工材料超声辅助切削加工技术[J]. 航空制造技术, 2012(16): 44-49.
KANG Renke, MA Fujian, DONG Zhigang, et al. Ultrasonic assisted machining of difficult-to-cut material[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2012(16): 44-49.
- [8] 苏阔. 铝基碳化硅复合材料的超声辅助磨削加工工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
SU Kuo. Study on the ultrasonic assisted grinding processing technology of SiCp/Al composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [9] 刘立飞, 张飞虎, 刘民慧. 碳化硅陶瓷的超声振动辅助磨削[J]. 光学精密工程, 2015(8): 2229-2235.
LIU Lifei, ZHANG feihu, LIU Minhui. Ultrasonic assisted grinding for silicon carbide[J]. Optics and Precision Engineering, 2015(8): 2229-2235.
- [10] 马付建. 超声辅助加工系统研发及其在复合材料加工中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
MA Fujian. The development of ultrasonic assisted machining system and its application in machining of composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [11] QIN N, PEI Z J, TREADWELL C, et al. Physics-based predictive cutting force model in ultrasonic-vibration-assisted grinding for titanium drilling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2009, 131: 0410114.
- [12] PEI Z J, FERREIRA P M. Modeling of ductile-mode material removal in rotary ultrasonic machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(10): 1399-1418.
- [13] CONG W L, PEI Z J, SUN X, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: A mechanistic predictive model for cutting force[J]. Ultrasonics, 2014, 54(2): 663-675.
- [14] ZHANG C, ZHANG J, FENG P. Mathematical model for cutting force in rotary ultrasonic face milling of brittle materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1-4): 161-170.
- [15] 周晓勤, 梁桂强, 郭婷婷. 铝基碳化硅复合材料超声振动辅助划痕表面形貌研究[J]. 功能材料, 2014(23): 23131-23133.
ZHOU Xiaolin, LIANG Guiqiang, GUO Tingting. Ultrasonic vibration assisted scratch surface morphology of silicon carbide particle reinforced aluminium matrix composites[J]. Functional Materials, 2014(23): 23131-23133.
- [16] FENG P, LIANG G, ZHANG J. Ultrasonic

- vibration-assisted scratch characteristics of silicon carbide-reinforced aluminum matrix composites[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(7): 10817-10823.
- [17] ZHANG C, FENG P, ZHANG J. Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of C-plane sapphire with a spherical indenter[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 64: 38-48.
- [18] CAO J, WU Y, LU D, et al. Material removal behavior in ultrasonic-assisted scratching of SiC ceramics with a single diamond tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 79: 49-61.
- [19] ZHOU M, ZHAO P. Prediction of critical cutting depth for ductile-brittle transition in ultrasonic vibration assisted grinding of optical glasses[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86: 1775-1784.
- [20] FENG P, LIANG G, ZHANG J. Ultrasonic vibration-assisted scratch characteristics of silicon carbide-reinforced aluminum matrix composites[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(7): 10817-10823.
- [21] ZHANG F, MENG B, GENG Y, et al. Friction behavior in nanoscratching of reaction bonded silicon carbide ceramic with Berkovich and sphere indenters[J]. *Tribology International*, 2016, 97: 21-30.
- [22] ZHENG F F, MA F J, WANG Y D, et al. The influence of amplitude on grinding force and surface roughness in ultrasonic assisted grinding of K9 glass[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1017: 741-746.
- [23] CAO J, WU Y, LU D, et al. Material removal behavior in ultrasonic-assisted scratching of SiC ceramics with a single diamond tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 79: 49-61.
- [24] SUYAMA S, KAMEDA T, ITOH Y. Development of high-strength reaction-sintered silicon carbide[J]. *Diamond and Related Materials*, 2003, 12(3-7): 1201-1204.
- [25] YAN J, ZHANG Z, KURIYAGAWA T. Mechanism for material removal in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(5): 366-374.
-
- 作者简介: 郑非非, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为硬脆材料的超声辅助磨削加工。
E-mail: zeflute@dlut.edu.cn
- 董志刚, 男, 1980 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为难加工材料高效加工技术及精密超精密加工技术。
E-mail: dongzg@dlut.edu.cn
- 张嘉桐, 女, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为硬脆材料的超声辅助磨削加工。
E-mail: 18842686639@163.com
- 刘津廷, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为复合材料的超声辅助加工。
E-mail: liujt910@126.com
- 康仁科(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密与特种加工技术、难加工材料高效加工技术、计算机辅助设计与制造技术。
E-mail: kangrk@dlut.edu.cn