

DOI: 10.3901/JME.2022.15.134

SiC_f/SiC 复合材料超声辅助干式侧磨砂轮 磨损研究*

董志刚 马槐遥 康仁科 杨峰 鲍岩
(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: 研究 SiC_f/SiC 复合材料超声辅助干式侧磨砂轮磨损, 为 SiC_f/SiC 复合材料超声磨削加工提供理论与技术支持。开展 SiC_f/SiC 复合材料超声辅助干式侧磨砂轮磨损实验, 研究超声振动对砂轮磨损的影响, 对砂轮表面进行追踪观测和微观分析, 提取磨粒磨损特征, 揭示砂轮磨损机制; 统计磨粒磨损平面面积, 掌握砂轮磨损规律; 分析砂轮磨损和超声振动对磨削力、材料去除率和表面粗糙度的影响。研究表明: 在普通干式侧磨和超声辅助干式侧磨加工中, 砂轮磨损均以磨耗磨损为主, 都会形成粗糙与平整的磨损平面。超声振动引入后, 断裂磨损增多, 包括磨粒断裂与磨粒脱落现象; 磨屑堵塞较少, 但是会产生较大的磨粒磨损平面; 磨粒磨损引起的砂轮直径减小更明显, 磨削力略微上升, 材料去除率降低; 工件表面粗糙度显著降低, 表面粗糙度 Sa 值最大可以降低约 30%。

关键词: SiC_f/SiC; 陶瓷基复合材料; 超声辅助磨削; 砂轮磨损

中图分类号: TH706

Study on Wear of Grinding Wheel in Ultrasonic Assisted Dry Side Grinding of SiC_f/SiC Composites

DONG Zhigang MA Huaiyao KANG Renke YANG Feng BAO Yan
(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: The wear of grinding wheel in ultrasonic assisted dry side grinding of SiC_f/SiC composite is studied to provide theoretical and technical support for ultrasonic grinding of SiC_f/SiC composite. The wear experiments of SiC_f/SiC composite ultrasonic assisted dry side grinding wheel are carried out, and the influence of ultrasonic vibration on the wear of grinding wheel is studied. Observing and analyzing the surface of grinding wheel, extracting the wear characteristics of abrasive particles and revealing the wear mechanism of grinding wheel; Counting the wear plane areas of abrasive particles and mastering the wear laws of grinding wheel; The effects of grinding wheel wear and ultrasonic vibration on grinding force, material removal rate and surface roughness are analyzed. The research shows that in ordinary dry side grinding and ultrasonic assisted dry side grinding, the wear of grinding wheel is mainly attritious wear, resulting in flat wear plane and rough wear plane. After the introduction of ultrasonic vibration, the fracture wear increases, including the phenomenon of grit fracture and grit pull-out; There is less debris blockage, but it will produce large abrasive wear plane; The grinding wheel diameter decreases more obviously, the grinding force increases slightly, and the material removal rate decreases; The surface roughness of the workpiece is significantly reduced, and the surface roughness Sa value can be reduced by about 30%.

Key words: SiC_f/SiC; ceramic matrix composite; ultrasonic assisted grinding; grinding wheel wear

0 前言

航空领域的高速发展对航空发动机关键构件的

性能提出了更高要求^[1-4], 已有相关研究表明, 在不改变航空发动机结构布局和使用材料的前提下, 最高只能将发动机推重比提升到 14, 对于推重比 15 以上的发动机, 迫切需要在材料制备、加工工艺和结构设计等方面取得新突破^[5]。经过几十年研究, 科学家发现具有耐高温、抗氧化、高韧性、低密度等优异性能的陶瓷基复合材料能够满足现代高推重

* 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT21GF403)、大连市高层次人才创新支持计划(2020RD02)和“兴辽英才计划”(XLYC2001004)资助项目。20211203 收到初稿, 20220418 收到修改稿

比航空发动机的需求^[6]。

陶瓷基复合材料是典型的各向异性硬脆材料,主要由纤维相和基体相构成,纤维相的引入使材料的断裂韧性相较于普通陶瓷有较大提高,并且对裂纹不敏感^[7]。由于陶瓷基复合材料航空发动机构件需具备较高的加工精度与表面质量,所以通常采用磨削加工方式,磨削加工是由许多随机分布的磨粒对材料产生切削的过程^[8]。对于硬脆材料而言,采用超声辅助磨削比普通磨削更具有优势^[9,10]。

近年来,国内外学者针对陶瓷基复合材料普通磨削和超声辅助磨削展开了许多研究,并取得了不错的成果。丁凯等^[11]进行 C_f/SiC 复合材料超声辅助磨削和普通磨削,研究了纤维破碎类型和磨削表面质量,发现纤维的断裂类型为脆性断裂,超声辅助磨削可以减少断裂并降低表面粗糙度约 12%。康仁科等^[12]研究了 SiC_f/SiC 复合材料普通磨削中引入超声振动对磨削力和表面质量的影响,结果表明:超声辅助磨削可有效降低磨削力和提高表面加工质量;在端面磨削条件下引入一定范围内的轴向超声振幅有助于改善表面加工质量,而过大的超声振幅会使表面质量降低。屈硕硕等^[13]研究了磨削深度和纤维方向对表面质量和磨削力的影响,发现增加磨削深度,会降低表面质量,增大磨削力,纤维方向角为 90° 时磨削表面质量较高。YIN 等^[14]研究了磨削速度对单颗粒划擦 SiC_f/SiC 复合材料去除机理和材料去除率的影响,得出在高速磨削过程中,纤维呈脆性断裂,基体被撕裂,提高磨削速度可以提高材料去除率。BERTSCHE 等^[15]研究表明在端面磨削陶瓷基复合材料中引入超声振动,法向磨削力与切向磨削力显著降低,超声辅助磨削条件下砂轮的轴向磨损更小,并根据实验结果提出高浓度和高粒度号的金属结合剂砂轮更适合加工陶瓷基复合材料。CHOUDHARY 等^[16]研究发现较大的未变形切屑厚度会增大磨削力并影响缺陷的形成,当磨削速度达到 200 m/s 时,磨削力较小,可以降低 C_f/SiC 复合材料的加工缺陷约 60%。GONZALO 等^[17]采用不同形状的单颗磨粒在 SiC_f/SiC 复合材料上进行划擦实验,研究了磨粒形状和纤维取向对划擦力和表面完整性的影响。结果表明:磨粒形状比纤维取向对划擦力影响更大,加工表面裂纹的起始位置由磨粒形状决定,而裂纹扩展方向由纤维取向决定。

现有陶瓷基复合材料普通磨削和超声辅助磨削研究主要在材料去除机理、表面完整性等方面开展,针对陶瓷基复合材料超声辅助磨削加工砂轮磨损研究较少。陶瓷基复合材料受现有制备工艺限制通常

存在孔隙,加工过程中使用的冷却液会通过毛细作用渗入孔隙,难以去除。在一些极端的使用环境中(超高温、真空)中,这些液体可能通过汽化直接损坏陶瓷基复合材料构件^[18-19]。除水冷以外,还可采用低温冷却方式,例如将液氮或者干冰喷射到加工区域^[20-21],这种方式能降低加工温度,提高工件加工质量,但是需要加装低温冷却系统,提高了陶瓷基复合材料的加工成本,因此在陶瓷基复合材料构件的批量生产中通常采用干磨方式。在干式磨削中,砂轮磨损问题尤为凸显,而砂轮磨损在精密加工中不可忽视,这会影响加工质量,加工效率和加工成本,进一步限制陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用。因此,本文开展 SiC_f/SiC 复合材料超声辅助干式侧磨砂轮磨损实验研究,探究超声振动对砂轮磨损的影响,分析砂轮磨损原因,揭示砂轮磨损机制,掌握砂轮磨损规律,为 SiC_f/SiC 复合材料超声辅助磨削加工提供理论与技术支持。

1 超声辅助磨削单颗磨粒运动分析

图 1 为超声辅助侧面磨削原理图,砂轮在自转的同时会产生沿轴向的高频振动,并保持沿工件的水平进给运动。因此超声辅助侧面磨削中单颗磨粒的运动轨迹是三种运动的合成:即绕砂轮轴线的旋转、砂轮的轴向振动和沿工件的进给运动。图 1 中, n_s 为主轴转速, v_w 为进给速度, a_p 为磨削深度, A 为振动幅值, f 为振动频率, R 为砂轮半径。

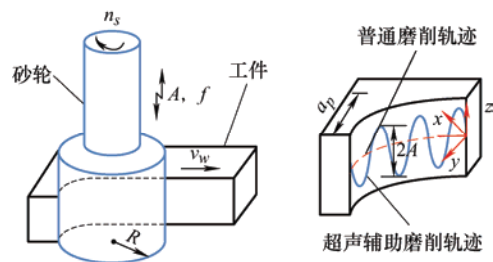


图 1 超声辅助侧面磨削原理图

根据以上参数,可以得到单颗磨粒在超声作用下的运动轨迹方程。

$$\begin{cases} x(t) = R \cos(2\pi n_s t) + v_w t \\ y(t) = R[1 - \sin(2\pi n_s t)] \\ z(t) = A \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)对时间 t 进行求导可以得到单颗粒的速度方程。

$$\begin{cases} v_x(t) = 2\pi n_s R \sin(2\pi n_s t) + v_w \\ v_y(t) = 2\pi n_s R \cos(2\pi n_s t) \\ v_z(t) = 2\pi f A \cos(2\pi f t) \end{cases} \quad (2)$$

普通磨削单颗磨粒轨迹长度 l_c 和超声辅助磨削单颗磨粒轨迹长度 l_u 可以根据式(2)计算得到

$$\begin{cases} l_c = \int_0^{t_0} \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} dt \\ l_u = \int_0^{t_0} \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} dt \end{cases} \quad (3)$$

从上式可看出, 普通磨削中引入超声振动使单颗磨粒在一个旋转周期内的运动轨迹更长。

2 实验装置与实验方法

2.1 实验装置

实验平台选用 KMC600SUMT 五轴立式加工中心(科德数控, 中国), 超声系统由大连理工大学自主研制, 可在 16~40 kHz 频率范围和 0~300 W 功率范围调节, 具有宽域扫频和频率自动跟踪功能。该实验平台与超声系统实现集成, 满足实验要求。

使用 Kistler9119AA2 压电测力仪(奇乐石, 瑞士)测量 X/Y/Z 轴三个方向的磨削力。

使用点激光测量系统(基恩士, 日本)测量超声振幅, 该系统包括: LK-H025 激光测头、LK-HD500 控制器和 LK-Navigator 电脑软件, 利用三角函数计算 CCD 阵列上反射光点位置变化即可得到砂轮端面的超声振幅, 实验装置组成如图 2 所示。

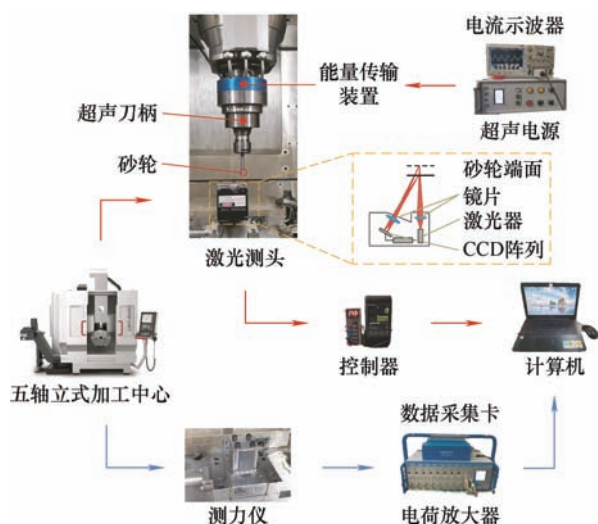


图 2 实验装置组成

2.2 实验方法

实验使用的 SiC_f/SiC 复合材料通过熔体浸渗工艺(MI)制成。 SiC 纤维经过二维编织方式制成具有两个纤维方向(0° 和 90°)的纤维预制体, 然后在一

定工艺条件下将熔融液态的 SiC 渗透至纤维预制体内, 得到 SiC_f/SiC 复合材料^[22]。

利用金刚石线锯将 SiC_f/SiC 复合材料切割成长度 25 mm、宽度 16 mm 和厚度 6 mm 的样件, 普通磨削和超声辅助条件下各使用两块样件。

使用两把同批次的金属结合剂金刚石砂轮, 直径 8 mm, 高度 9 mm, 磨粒粒径 120 μm , 浓度 75%, 分为两种砂轮磨损实验条件(有无超声), 具体参数如表 1 所示。为更加贴近 SiC_f/SiC 复合材料航空发动机热端构件的加工冷却要求, 实验中不使用冷却液。

表 1 砂轮磨损实验参数

参数	数值	
	1	2
转速/(r/min)	5 000	5 000
进给速度/(mm/min)	100	100
y向磨削深度/mm	0.02	0.02
z向磨削宽度/mm	4	4
超声参数/(kHz, μm)	无超声	21.9, 3

实验过程如图 3 所示, 首先测量新砂轮的半径, 观测新砂轮的表面, 测量新砂轮的磨削力, 然后磨削样件 A(用于使砂轮磨损)、磨削样件 B(测量磨削力), 测量样件 A 实际磨削深度, 测量磨损后的砂轮半径, 观测磨损后的砂轮表面, 再进行下一轮的磨损实验, 总共循环 4 轮。将样件 A 沿 z 方向均分为 4 层, 每层高度为 4 mm, 一轮循环只去除样件 A 的一层材料。去除样件 A 的第一层材料需要沿 x 负方向单向磨削 167 次, 磨削长度为 4.175 m; 为保证第一层已加工表面不被第二层磨削破坏, 去除第二层材料仅沿 x 负方向磨削 164 次(磨削长度为 4.1 m), 以此类推: 第三层磨削 161 次(磨削长度为 4.025 m), 第四层磨削 158 次(磨削长度为 3.95 m)。图 3 中左上为样件 A(白色虚线区域为 1 300 mm^3 的待磨削材料, 磨削长度总共计 16.25 m)与夹具, 右上为样件 B 与测力仪, 设置样件 A 与样件 B 是为避免长时间干式磨削产生热量堆积影响测力仪的准确性。样件 A 的实际磨削深度通过机床测头测得, 砂轮半径可通过调刀仪(德马吉, 德国)测量, 砂轮表面形貌使用超景深显微镜(基恩士, 日本)进行观测。上述实验过程到第四次循环结束。实验完成后, 利用白光干涉 3D 表面轮廓仪(zygo, 美国)对样件 A 的加工表面进行测量, 每次采集 3 个区域的表面粗糙度取平均值。使用 Q45 扫描电镜(FEI, 美国)对砂轮表面磨粒进行微观观测。

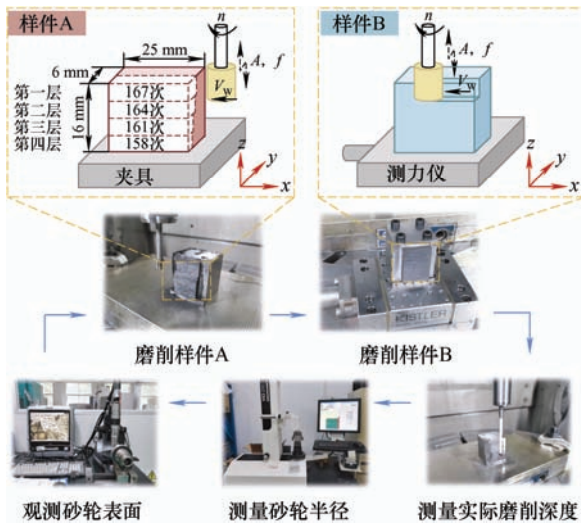


图3 砂轮磨损循环实验

3 实验结果及其分析

3.1 砂轮磨损机制

使用超景深显微镜对砂轮表面进行 30 倍观测, 此时磨削长度 16.25 m。从图 4 可发现: 普通磨削砂轮表面存在大面积的磨屑堵塞现象, 黑色磨屑堵塞在砂轮表面遮盖了金属结合剂的光泽, 而超声辅助磨削砂轮表面比较光亮, 未发现大面积的磨屑堵塞。

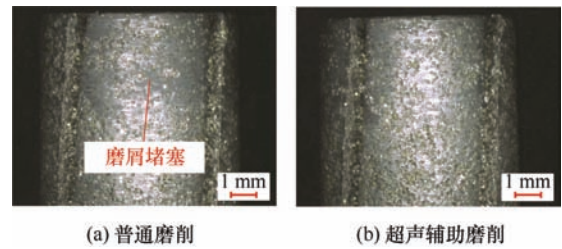


图4 普通磨削与超声辅助磨削砂轮表面对比

根据实验方法, 以磨削样品 A 产生的磨削长度作为变量研究砂轮磨损机制, 忽略磨削样品 B 产生的磨削长度。磨削长度为 0 m 表示砂轮未磨损状态, 此时还未磨削样品 A, 随着样品 A 的每一层材料被去除, 磨削长度逐渐增加, 分别在砂轮未磨损状态和磨削长度为 4.175 m、8.275 m、12.3 m 和 16.25 m 对砂轮表面多个区域进行跟踪观测。实验开始前, 随机选择多个区域进行观测记录, 达到磨削长度后, 继续对这些区域进行拍摄, 以此得到不同区域在不同磨削长度的图片。本实验的观测区域众多, 文中仅呈现具有代表性的区域。

图 5 为普通磨削砂轮表面三个不同区域的磨粒跟踪观测结果(超景深显微镜放大倍数均为 500)。通过拍摄砂轮表面同一区域在不同磨削长度后的形貌图像, 得到该区域的磨粒在整个实验周期内的磨损变化情况。

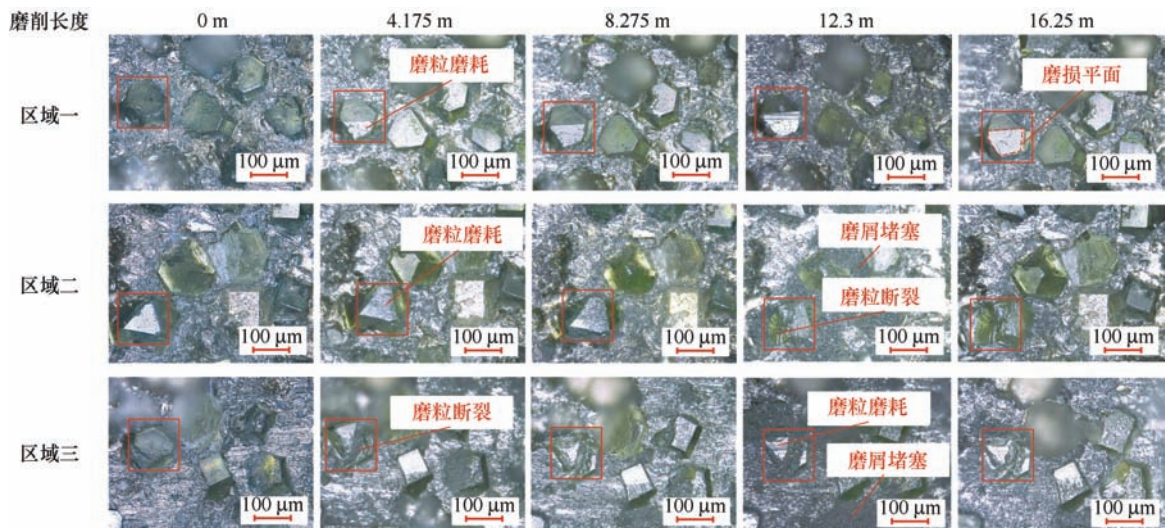


图5 普通磨削磨粒追踪观测

区域一中的磨粒发生了磨耗磨损, 磨粒表面形成磨损平面, 随着磨削长度的逐渐增加, 该磨损平面逐渐扩大, 磨粒磨损平面的形成和扩大是磨耗磨损的典型特征。

区域二中的磨粒从未磨损状态到磨削长度为 8.275 m 发生磨耗磨损, 到 12.3 m 时, 发生磨粒断裂, 形成断裂面。磨削产生的磨屑堵塞在砂轮表面

磨粒与结合剂空隙处。磨耗磨损和磨粒断裂在同一颗磨粒出现说明单颗磨粒在整个寿命周期内可能会出现多种磨损形式。

区域三中的磨粒从未磨损状态到磨削长度为 4.175 m 发生磨粒断裂, 随着磨削长度的增加该磨粒产生磨耗磨损, 形成磨损平面。该区域的磨粒与区域二的磨粒均发生了两种磨损形式, 但是, 区域三

的磨粒先产生磨粒断裂,后出现磨耗磨损。通过观测发现,区域三中同样也出现磨屑堵塞现象。

图 6 为超声辅助磨削砂轮表面三个不同区域的

磨粒跟踪观测结果(超景深显微镜放大倍数均为 500)。区域一中的磨粒发生了磨耗磨损,磨粒表面产生磨损平面,该平面随着磨削长度增加逐渐扩大。

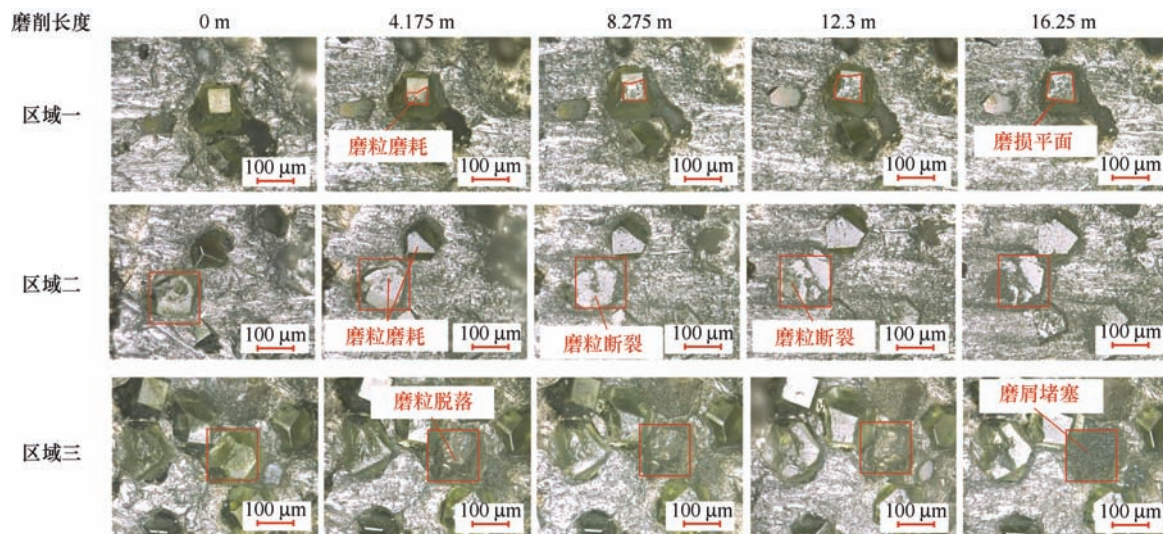


图 6 超声辅助磨削磨粒跟踪观测

区域二中的磨粒先发生磨耗磨损产生磨损平面,接着磨粒的磨损平面产生断裂,整个平面不再完整,到磨削长度为 12.3 m 时,该颗磨粒的边缘位置出现大块断裂,磨粒出现碎片化的脱落。

区域三中的磨粒出现磨粒脱落现象,该颗磨粒脱落后在结合剂表面留下空腔,随着磨削长度的增加,空腔内出现磨屑堵塞现象。

根据以上磨粒追踪观测结果,得出普通磨削和超声辅助磨削的砂轮磨损机制:普通磨削和超声辅助磨削均出现磨耗磨损、断裂磨损(磨粒断裂、磨粒脱落)和磨屑堵塞;磨削加工中主要是机械摩擦作用,因此磨耗磨损为主要磨损机制;在超声辅助磨削条件下磨粒断裂较多并伴随少量的磨粒脱落,这两种形式均属于断裂磨损;另外,两种加工条件下均发现磨屑堵塞现象,普通磨削条件下磨屑堵塞严重,超声辅助磨削条件下的磨屑堵塞较为轻微,高频超声振动的引入对磨屑堵塞有一定的缓解作用。根据以上结论,两种加工条件的砂轮磨损机制可总结为图 7。

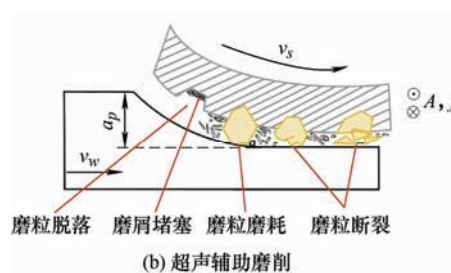


图 7 普通磨削和超声辅助磨削砂轮磨损机制示意图

3.2 磨粒微观观测

图 8 为超声辅助磨削条件下磨耗磨损产生磨损平面的扫描电镜图片,图中红色虚线区域为磨损平面,通过测算,该磨损平面面积约为 $12\ 000\ \mu\text{m}^2$ 。从图中可以看出此平面比较粗糙,平面的边缘位置分布着大大小小的凹坑,平面上附着有少量白色物质,根据 EDS 分析得出:该物质主要含有 C 元素与 Si 元素,推断为 SiC 磨屑。

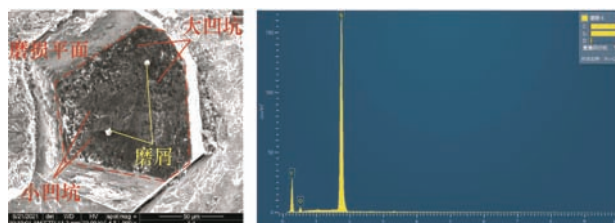
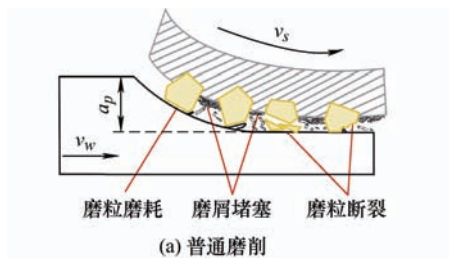


图 8 磨耗磨损 SEM 观测与 EDS 分析结果

超声辅助磨削条件下某颗断裂磨粒扫描电镜图片如图 9 所示,该磨粒与图 6 区域二中的红框



磨粒为同一颗。由图 6 区域二可知,该颗磨粒先发生磨耗磨损,然后磨粒断裂。通过 SEM 观测发现:该磨粒原有的磨损平面断裂分为了 A、B、C、D 四个区域,A 区域的磨损平面比较平整,与图 8 中粗糙的磨损平面有较大的区别。图中磨粒断裂处出现颗粒物堵塞现象,根据 EDS 分析得出:该颗粒物主要含 C 元素与 Si 元素,推断为 SiC 磨屑。经过 EDS 检测砂轮结合剂成分发现含有 Co 元素,推断颗粒物堵塞区中少量的 Co 元素来自砂轮结合剂。

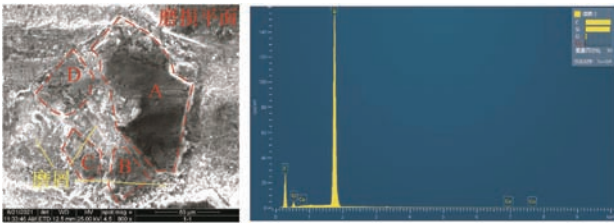


图 9 磨粒断裂 SEM 观测与 EDS 分析结果

图 10 为普通磨削条件下磨粒断裂的扫描电镜图片。该磨粒产生了粗糙的磨损平面,并出现磨粒断裂现象。通过增加放大倍数发现:磨粒的断裂面上出现了阶梯状解理断裂,不同阶梯状断裂之间出现交叉,说明磨粒断裂面的裂纹源不止一处,多处裂纹源产生裂纹并扩展交叉,形成闭合裂纹后出现磨粒断裂。由于磨粒复杂的加工环境导致其产生磨耗磨损和断裂磨损两种磨损形式。

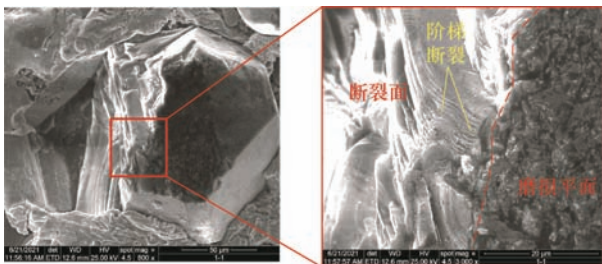


图 10 磨粒断裂面 SEM 观测

3.3 磨粒磨损平面面积

从 80 多张磨粒追踪观测照片中选取产生磨粒磨损磨损的图片,并使用图像识别软件测量磨粒磨损平面面积,得到磨粒磨损平面面积随磨削长度的变化规律。图 11 为普通磨削和超声辅助磨削条件下两颗典型磨粒的磨损平面面积变化规律。磨削长度 16.25 m 时,普通磨削 1#磨粒达到 $6\,915\,\mu\text{m}^2$,超声辅助磨削 1#磨粒的磨损平面面积达到 $11\,920\,\mu\text{m}^2$ 。

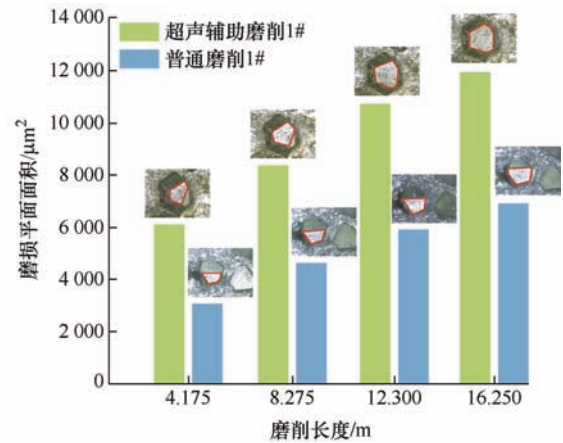


图 11 典型磨粒磨损平面面积变化

为更加客观地对比普通磨削和超声辅助磨削条件下磨粒磨损平面面积变化规律,选取两种条件下相同数目的磨粒并统计其磨损平面面积之和,得到磨损平面总面积随磨削长度的变化,如图 12 所示。对比发现:不同磨削长度下超声辅助磨削的磨粒磨损平面面积均大于普通磨削,通过线性拟合两组数据发现:超声辅助磨削数据拟合直线的斜率大于普通磨削,说明超声辅助磨削的磨粒磨损平面面积增长速率更快,从这一数据的变化规律可推断出超声辅助磨削比普通磨削产生了更快的磨损。

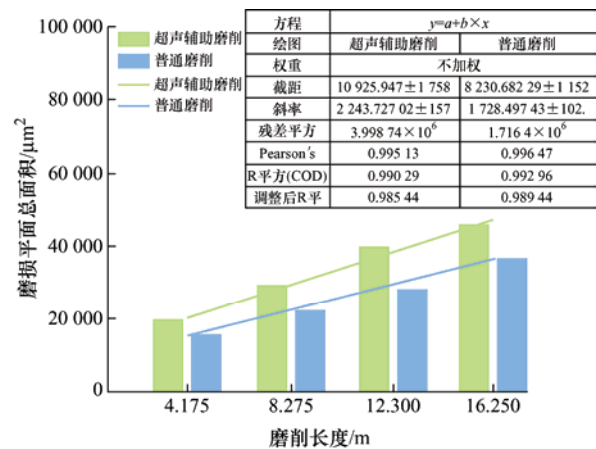


图 12 磨损平面总面积变化及线性拟合

3.4 砂轮直径减小量

图 13 为普通磨削和超声辅助磨削条件下砂轮的直径减小量变化曲线。

从图中可以发现:在这两种条件下,砂轮均发生明显的磨损,超声辅助磨削中砂轮直径减小量大于普通磨削。其原因是:在侧磨加工中,无论普通磨削还是超声辅助磨削,磨粒与材料均是连续接触作用过程;根据前文单颗磨粒运动轨迹分析可知:超声振动的引入使得每一颗磨粒的运动轨迹变长,磨粒与材料的接触长度增加,根据经典滑动磨损理

论^[23], 累积磨损取决于滑动距离, 磨粒与材料接触长度的增加使磨粒滑动距离变长, 因此超声辅助磨削条件下砂轮磨损更大, 直径减小更多。

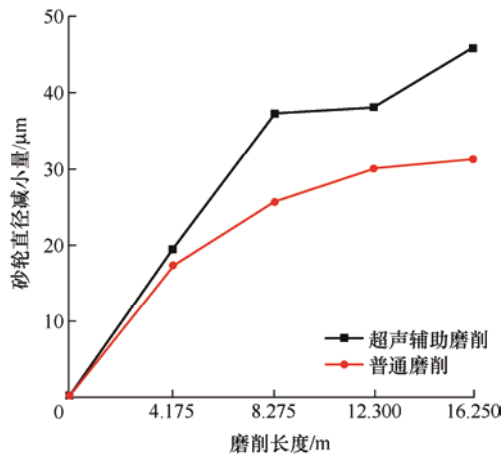


图 13 砂轮直径减小量随磨削长度的变化

3.5 磨削力

根据 2.2 实验方法, 磨削样件 A 使得砂轮产生磨损, 磨削样件 B 用于测量磨削力。文中均不计磨削样件 B 产生的磨削长度, 磨削长度为 0 m 的磨削力表示砂轮未磨损时磨削样件 B 测力得到, 此时还未开始磨削样件 A, 因而未产生磨削长度。磨削长度 4.175 m 表示去除样件 A 的第一层材料后, 磨削样件 B 测力得到, 后面的数据均为去除样件 A 一层材料后, 磨削样件 B 测力得到。

图 14 和 15 为普通磨削和超声辅助磨削条件下磨削长度的增加对法向磨削力和切向磨削力的影响。

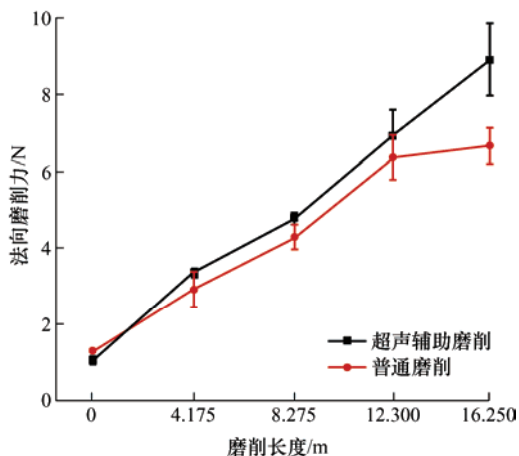


图 14 法向磨削力随磨削长度变化

由图 14 和图 15 可知: 普通磨削和超声辅助磨削的法向磨削力和切向磨削力均随着磨削长度的增加而增加, 法向磨削力始终大于切向磨削力。砂轮的主要磨损形式为磨耗磨损, 随着磨削长度增加, 磨耗磨损使磨粒磨损平面面积逐渐增大, 导致磨粒

与工件的挤压力增加, 磨削力增加。在砂轮未磨损时, 超声辅助磨削的磨削力小于普通磨削, 这是由于超声辅助磨削条件下磨屑堵塞较少, 并且超声振动引入使磨粒运动轨迹变长, 未变形切屑厚度降低^[24], 因此在实验初期磨削力较小。但是随着磨削长度的增加, 超声辅助磨削的砂轮磨损比普通磨削更大, 较大的砂轮磨损对磨削力产生更大的影响, 从而导致超声辅助磨削的磨削力略大于普通磨削。由此可见, 超声振动的引入对磨削力的降低有一定限度, 在砂轮磨损较小的初期, 超声对磨削力的减小作用明显, 砂轮磨损较大后, 超声作用减弱。因此可对砂轮进行修锐保证其磨粒的锋利程度, 保持超声对磨削力的减小作用。

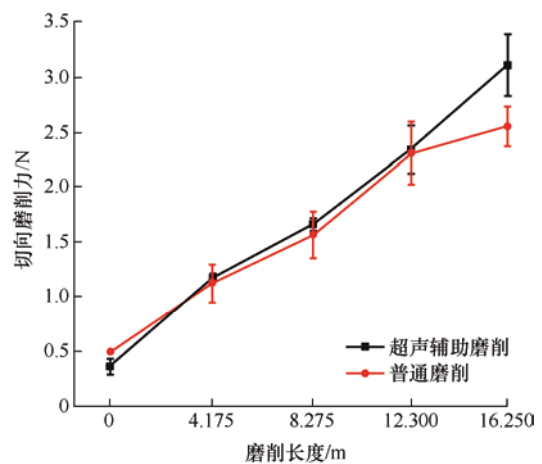


图 15 切向磨削力随磨削长度变化

3.6 材料去除率

通过图 3 循环实验中使用机床自带测头可以测量实际磨削深度, 进一步可计算出在普通磨削和超声辅助磨削条件下材料的实际去除体积, 根据材料去除体积与磨削时间的比值可得到材料去除率, 结果如图 16 所示。

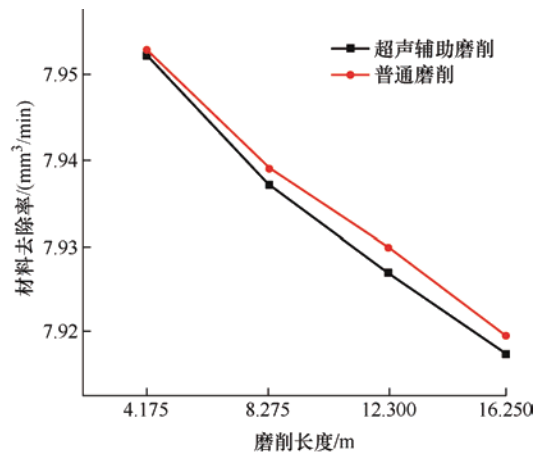


图 16 材料去除率随磨削长度变化

从上图中可以看出,随着磨削长度的增加,材料去除率逐渐下降,普通磨削的材料去除率略大于超声辅助磨削。磨削长度增加后,磨粒逐渐磨损变钝,磨粒的材料去除能力下降,导致材料去除率下降。由于超声辅助磨削的砂轮磨损较大,超声辅助磨削条件下的材料去除率较低。

3.7 表面粗糙度

图 17 为磨削长度为 0 m 和 16.25 m 已加工表面的三维形貌。使用新砂轮时,普通磨削和超声辅助磨削形成的表面均出现较大的凹坑和突起,表面粗糙度较大;随着磨削长度的增加,两种加工条件下的表面质量均有所提升,已加工表面出现均匀一致的划痕,表面起伏程度减小,并且超声辅助磨削的表面形貌较普通磨削表面更加平整。对比图中磨削长度为 0 m 和 16.25 m 的算术平均高度 S_a 和最大高度 S_z 数值,超声辅助磨削均低于普通磨削,说明超声振动的引入有利于提升表面加工质量。

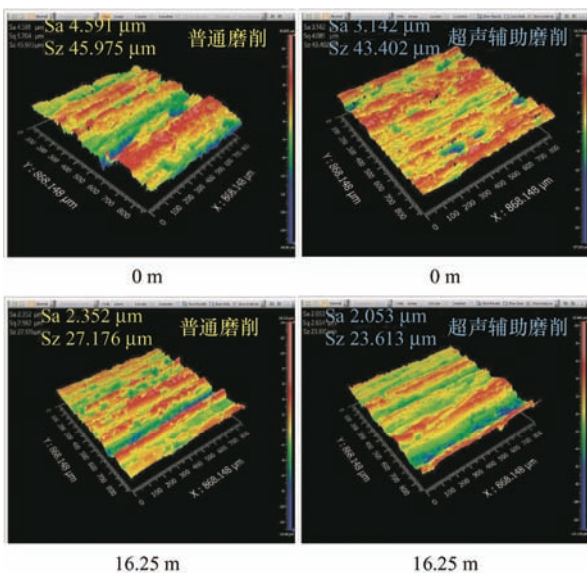


图 17 普通磨削和超声辅助磨削三维表面形貌

通过多次测量得到图 18 表面粗糙度随磨削长度变化曲线。在普通磨削和超声辅助磨削条件下,表面粗糙度 S_a 均随着磨削长度的增加而减小,其原因是:在砂轮磨损初期,不规则的磨粒分布与不均匀的磨粒突出高度导致表面粗糙度较大;随着砂轮经过一定量磨损,突出的磨粒被磨平,磨粒突出高度变得均匀,磨粒等高性变好,从而获得较好的表面质量。因此在本研究的磨削长度内,砂轮磨损尚未使磨削表面质量进入恶化阶段。超声振动的引入使不同磨粒的运动轨迹更容易产生交错重叠,对已加工表面产生重复研磨作用,并且超声辅助磨削条件下磨屑堵塞情况较为轻微,因此超声辅助磨削的

表面粗糙度低于普通磨削。

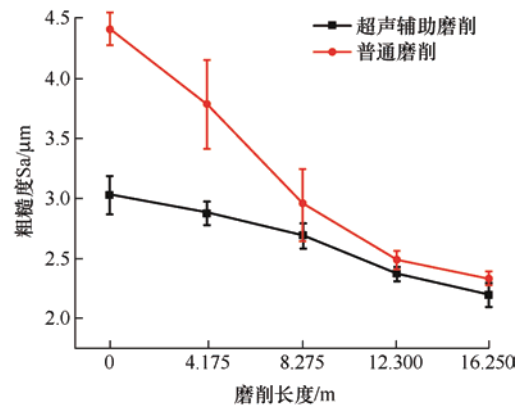


图 18 表面粗糙度随磨削长度变化

4 结论

(1) 普通磨削和超声辅助磨削加工中的砂轮磨损机制均以磨耗磨损为主,都会形成平整与粗糙的磨损平面;超声振动引入后断裂磨损增多,包括磨粒断裂与磨粒脱落现象;超声辅助磨削中磨屑堵塞较少,但是磨粒磨损平面面积较大。

(2) 随着磨削长度的增加,砂轮直径减小量和磨削力均呈增加趋势,材料去除率呈减小趋势。普通磨削中引入超声振动会增大砂轮磨损,导致磨削力略微增加,材料去除率降低。

(3) 在本研究的磨削长度内,普通磨削和超声辅助磨削中工件的表面粗糙度随着磨削长度的增加而减小,并且在普通磨削加工中引入超声振动最大能够降低表面粗糙度约 30%。

(4) SiC_f/SiC 复合材料普通磨削砂轮磨损较慢,材料去除率较高,因此适合 SiC_f/SiC 复合材料的粗磨阶段,超声辅助磨削可以带来更好的表面加工质量,适合 SiC_f/SiC 复合材料的精磨阶段。需要注意的是:两种加工均需要对砂轮的磨损情况进行监测,适时对砂轮进行修锐,保证磨粒的锋利程度,避免砂轮严重磨损导致表面质量变差。

参考文献

- [1] 刘巧沐,黄顺洲,何爱杰. 碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用需求及挑战[J]. 材料工程, 2019, 47(2): 1-10.
LIU Qiaomu, HUANG Shunzhou, HE Aijie. Application requirements and challenges of CMC-SiC composites on aero-engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(2): 1-10.

- [2] 梁春华. 纤维增强陶瓷基复合材料在国外航空发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2006, 4(3): 40-45.
LIANG Chunhua. Application of continuous fiber reinforced metal matrix composite component on turbofan aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 4(3): 40-45.
- [3] 程涛涛, 王志平, 戴士杰, 等. 航空发动机陶瓷基高温封严涂层研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 126-136, 147.
CHENG Taotao, WANG Zhiping, DAI Shijie, et al. Research progress of ceramic-based high temperature sealing coatings for aeroengines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 126-136, 147.
- [4] 李文辉, 温学杰, 李秀红, 等. 航空发动机叶片再制造技术的应用及其发展趋势[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(4): 8-18.
LI Wenhui, WEN Xuejie, LI Xiuhong, et al. Application and development trend of aero-engine blade remanufacturing technology[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(4): 8-18.
- [5] 江义军. 推重比 12~15 发动机技术途径分析[J]. 航空动力学报, 2001, 4(2): 103-107.
JIANG Yijun. Technical approaches to thrust-weight ratio 12~15 of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 4(2): 103-107.
- [6] 刘虎, 杨金华, 周怡然, 等. 国外航空发动机用 SiC_f/SiC 复合材料的材料级性能测试研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(11): 1-12.
LIU Hu, YANG Jinhua, ZHOU Yiran, et al. Progress in coupon tests of SiC_f/SiC ceramic matrix composites used for aeroengines[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(11): 1-12.
- [7] MAILLET E, GODIN N, M R'MILI, et al. Damage monitoring and identification in SiC/SiC minicomposites using combined acousto-ultrasonics and acoustic emission[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2014, 57: 8-15.
- [8] LI C, LI X L, WU Y Q, et al. Deformation mechanism and force modelling of the grinding of YAG single crystals[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 143: 23-27.
- [9] 查慧婷, 冯平法, 张建富, 等. 高体积分数 SiC_p/Al 复合材料旋转超声铣磨加工的试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 107-113.
ZHA Huiting, FENG Pingfa, ZHANG Jianfu, et al. An experimental study on rotary ultrasonic machining of high volume fraction silicon carbide-reinforced aluminum matrix Composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 107-113.
- [10] 丁凯, 李奇林, 苏宏华, 等. 硬脆材料超声辅助磨削技术研究现状及展望[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(1): 5-14.
DING Kai, LI Qilin, SU Honghua, et al. Study Status and future prospect on ultrasonic assisted grinding of hard and brittle materials[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(1): 5-14.
- [11] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Study on surface/subsurface breakage in ultrasonic assisted grinding of C/SiC composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9-12): 3095-3015.
- [12] 康仁科, 赵凡, 鲍岩, 等. 超声辅助磨削 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(4): 85-91.
KANG Renke, ZHAO Fan, BAO Yan, et al. Ultrasonic assisted grinding of SiC_f/SiC composites[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(4): 85-91.
- [13] QU S S, GONG Y D, YANG Y Y, et al. Grinding characteristics and removal mechanisms of unidirectional carbon fibre reinforced silicon carbide ceramic matrix composites[J]. Ceramics International, 2019, 45(3): 3059-3071.
- [14] YIN J F, XU J H, DING W F, et al. Effects of grinding speed on the material removal mechanism in single grain grinding of SiC_f/SiC ceramic matrix composite[J]. Ceramics International, 2021, 47: 12795-12802.
- [15] BERTSCHE E, EHMANN K, MALUKHIN K. Ultrasonic slot machining of a silicon carbide matrix composite[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66: 945-955.
- [16] CHOUDHARY A, DAS C N, PAUL S. Identification and estimation of defects in high-speed ground C/SiC ceramic matrix composites[J]. Composite Structures, 2021, 261: 113274.
- [17] GONZALO G L, DRAGOS A, DONKA N. Influence of grit geometry and fibre orientation on the abrasive material removal mechanisms of SiC/SiC ceramic matrix composites (CMCs)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 157: 103580.
- [18] AN Q, CHEN J, MING W, et al. Machining of SiC ceramic matrix composites: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 540-567.

- [19] TASHIRO T, FUJIWARA J, TAKENAKA Y. Grinding of C/C-SiC composite in dry method[M]. London: Springer, 2007.
- [20] 徐亮, 王凯, 王新永, 等. Cf/SiC 复合材料低温铣削工艺优化研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 51(1): 36-40.
- XU Liang, WANG Kai, WANG Xinyong, et al. Research on optimization of low-temperature milling process for Cf/SiC composites[J]. Machinery Building and Automation, 2021, 51(1): 36-40.
- [21] XU L, ZHAO G, ZHANG J, et al. Feasibility study on cryogenic milling of carbon fiber reinforced silicon carbide composites[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(3): 424-433.
- [22] 王洋, 贺丽娟, 刘圆圆, 等. SiC/SiC 复合材料制备技术研究进展[J]. 飞航导弹, 2019(6): 92-97.
- WANG Yang, HE Lijuan, LIU Yuanyuan, et al. Research progress on preparation technology of SiC/SiC composites[J]. Cruise Missile, 2019(6): 92-97.
- [23] ARCHARD J. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. J. Appl. Phys., 1953, 24: 981-988.
- [24] CHEN J, AN Q L, MING W W, et al. Investigation on machined surface quality in ultrasonic-assisted grinding of Cf/SiC composites based on fracture mechanism of carbon fibers[J]. Journal of Technology, 2020, 109: 1583-1599.
-
- 作者简介:** 董志刚, 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为难加工材料高效加工技术与装备、精密超精密加工技术与装备。
E-mail: dongzg@dlut.edu.cn
- 鲍岩(通信作者), 男, 1987 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超声辅助加工理论与技术、弱刚度构件精密加工理论与技术。
E-mail: baoy@dlut.edu.cn