

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.018

超声振动辅助磨削 SiC_f/SiC 复合材料的频率和振幅影响研究

王儒康, 苏宏华, 何静远, 许鹏飞, 韩大康, 陈玉荣

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对超声振动频率和振幅对 SiC_f/SiC 复合材料磨削过程中的磨削力及工件表面粗糙度和微观形貌影响规律不明确的问题, 在不同的振动频率和振幅下对 SiC_f/SiC 复合材料开展超声振动辅助磨削试验研究。结果表明: 超声振动的引入可以有效降低磨削力和表面粗糙度, 振动频率的提高可以有效降低磨削力和表面粗糙度, 振幅的变化对磨削力和表面粗糙度的影响不大; 超声振动的引入促使纤维断裂, 磨屑中纤维的长度下降, 有助于表面加工质量的提高。

关键词: SiC_f/SiC ; 超声振动辅助磨削; 磨削力; 表面粗糙度; 表面微观形貌

中图分类号: TG580.699 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2024)04-0097-04

Effect Reserch of Frequency and Amplitude of SiC_f/SiC Composites in Ultrasonic Assisted Grinding

WANG Rukang, SU Honghua, HE Jingyuan, XU Pengfei, HAN Dakang, CHEN Yurong

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

Abstract: With regard to the lack of clearance about the influence of ultrasonic vibration frequency and amplitude on the grinding force, surface roughness and microstructure of SiC_f/SiC composites during grinding, this paper conducts the ultrasonic vibration assisted grinding experiments on SiC_f/SiC composites under different vibration frequencies and amplitudes. The results show that the introduction of ultrasonic vibration and the increase of vibration frequency both can effectively reduce the grinding force and surface roughness, but the change of amplitude has little effect on the grinding force and surface roughness. The introduction of ultrasonic vibration promotes fiber breakage, and the length of the fiber in the wear debris decreases, which helps to improve the surface processing quality.

Keywords: SiC_f/SiC ; ultrasound-assisted grinding; grinding force; surface roughness; surface micro-topography

0 引言

碳化硅纤维增强陶瓷基复合材料 (SiC_f/SiC) 作为一种新型的耐高温结构材料, 具有耐高温、耐腐蚀、高比模量、高比强度等优异性能, 是未来航空发动机热端部件的首选材料^[1-2]。

SiC_f/SiC 复合材料构件要求一定的尺寸和形状精度, 以满足装配和使用要求, 然而通过化学气相浸透 (CVI) 法、先驱体浸渗热解 (PIP) 法、浆料浸渍结合热压 (SIHP) 法和反应性熔体渗透 (RMI) 等方法制备的 SiC_f/SiC 复合材料毛坯尺寸和形状精度较差^[3-4]。因此, 材料毛坯成形后的二次加工是 SiC_f/SiC 复合材料构件不可或缺的重要环节。然而由于 SiC_f/SiC 复合材料高硬度、高脆性和各向异性的特点, 在加工过程中存在刀具磨损严重、加工表面质量差、加工效率低等问题, 因此寻求 SiC_f/SiC 复合材料的高效精密加工方法是当前的研究热点^[5-6]。

目前, 超声振动辅助磨削加工已成为 SiC_f/SiC 复合材料精密加工中最具发展潜力的加工方法^[7-8]。相比于普通磨削加工, 磨具上添加的轴向超声振动改变了磨粒的运动轨迹, 磨具与工件由连续接触变为间歇接触, 减小了工具磨损, 同时也降低了表面和亚表面的磨削损伤, 提高了加工表面质量^[9]。在试验研究中, 亦观察到在不同的纤维方向和进给方向的夹角下, 超声振动辅助磨削都显著降低了磨削力, 提高了加工表面质量^[10-11]。但是, 已有关于超声振动辅助磨削研究中的超声频率一般集中在 20 kHz 左右, 尚缺乏对振动频率影响的研究。

本文采用有序排布钎焊金刚石砂轮在超声频率 24~65 kHz 的条件下, 开展了普通磨削加工和不同频率超声振动辅助磨削加工, 探究超声频率和超声振幅对磨削力、加工表面粗糙度和微观形貌的影响规律。

第一作者简介: 王儒康 (1997—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向为复合材料超声磨削加工, wz12847369772@163.com。

1 试验条件

1.1 试验材料与磨具

试验所使用的 SiC_f/SiC 复合材料如图 1 所示,为 2.5D 编制,采用聚合物浸渍热解(PIP)制成。本次试验的磨削工件尺寸为 4 mm×30 mm×4 mm。磨具为有序排布钎焊金刚石砂轮,如图 2 所示,磨粒尺寸为#80/100(粒径 150~180 μm),磨粒轴向排布夹角为 45°,磨粒周向间距 1.2 mm。

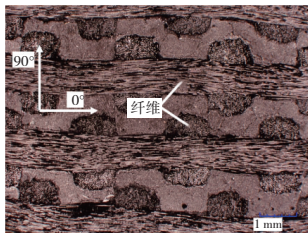


图 1 SiC_f/SiC 复合材料 图 2 有序排布砂轮表面形貌

1.2 加工条件

磨削试验在 DMG Ultrasonic 20 Linear 加工中心上进行。超声振动装置为自主研发的 HSK-E32 超声刀柄及超声系统,刀柄最大转速为 35 000 r/min,通过更换不同型号的刀柄来实现不同振动频率的超声加工。其中 SiC_f/SiC 复合材料工件通过石蜡粘在夹具上,并通过虎钳固定在 KISTLER 91290a 型测力仪上。磨削加工试验系统实物如图 3 所示。磨削加工试验采用侧面磨削方式(图 4),超声振动方向为砂轮轴向振动,试验采用干式加工,并在加工时收集磨屑。

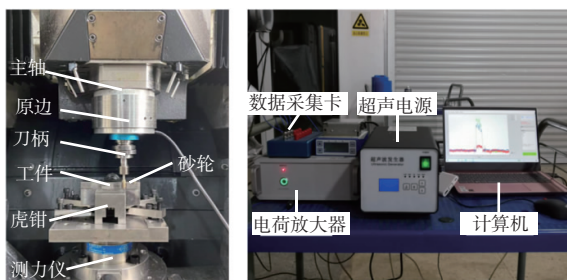


图 3 超声磨削试验平台

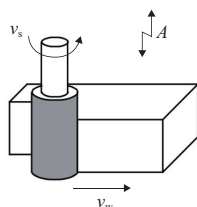


图 4 侧向超声振动辅助磨削示意图

试验前采用单点激光测振仪 LV-S01 测量不同频率刀柄的谐振频率,通过改变电源的输出功率调节振幅,使刀柄的振幅达到所需的数值。磨削试验采用单因素试验方法,具体试验参数如表 1 所示。

表 1 试验参数

超声频率 f/kHz	振幅 $A/\mu\text{m}$	磨削速度 $v_s/(\text{m/s})$	进给速度 $v_w/(\text{mm/min})$	磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$
0, 24, 40, 65	3	1.8	800	50
24	0, 3, 5, 8	1.8	800	50

1.3 检测条件

通过 COXEM EM-30 Plus 扫描电镜对试样表面微观形貌进行观测,观测前使用丙酮溶液对工件进行清洗,避免磨屑对表面微观形貌的影响。选择表面粗糙度对磨削表面进行评价。表面粗糙度由 Sensofar 3D 光学轮廓仪测量得到,每个试样表面测量 18 次,结果取平均值,使测量结果尽可能地反映整个磨削表面的情况。

2 试验结果与讨论

2.1 磨削力

振动频率对磨削力的影响如图 5 所示。从图中可以看出,在固定振幅为 3 μm 时,不同振动频率下磨削力随着振动频率的增大而减小。当振动频率从 24 kHz 增大至 40 kHz 时,切向磨削力和法向磨削力分别降低 17% 和 18%,当振动频率提升至 65 kHz 时,切向磨削力和法向磨削力分别下降了 27% 和 31%。

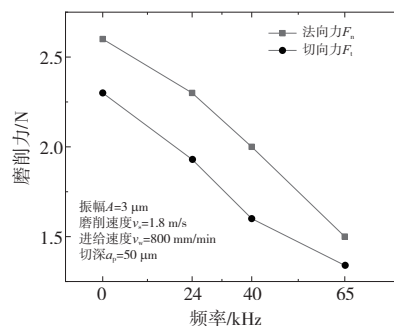


图 5 振动频率对磨削力的影响

单颗磨粒最大切厚是影响磨削力的重要因素。磨削力随着单颗磨粒最大切厚的减小而减小,超声振动的引入改变了单颗磨粒最大切厚。在磨削过程中,普通磨削的单颗磨粒最大切厚

a_{gmax} 和超声振动辅助磨削的单颗磨粒最大切厚 a_{Ugmax} 可以表示为:

$$a_{gmax} = \sqrt{\frac{4 v_w a_p}{v_s C_d r l_s}} \quad (1)$$

$$a_{Ugmax} = \sqrt{\frac{4 v_w a_p}{v_s C_{dus} r_{us} l_{us}}} \quad (2)$$

式中: C_d 和 C_{dus} 分别是普通磨削和超声辅助磨削过程中单位面积的动态磨削数; r 和 r_{us} 分别为普通磨削和超声辅助磨削下平均磨削宽度与平均磨削厚度之比; l_s 和 l_{us} 分别代表不同磨削和超声辅助磨削的磨粒与工件的接触长度。

在超声辅助磨削过程中,磨粒的运动轨迹是一条正弦曲线,磨粒与工件的接触长度大于普通磨削下磨粒与工件的接触长度,且振动频率越高,接触长度越长。因此,由式(1)和式(2)可知,超声振动辅助磨削可以降低单颗磨粒切厚,且单颗磨粒切厚随着振动频率的增大而减小,这与图5中的磨削力变化趋势相吻合。

和普通磨削相比,不同振幅的超声振动辅助都可以降低法向磨削力和切向磨削力(图6)。普通磨削时,其切向磨削力和法向磨削力分别为 2.60 N 和 2.30 N。当超声振动振幅为 3 μm 时,切向磨削力和法向磨削力降低至 2.20 N 和 1.93 N。当振幅提升至 5 μm 和 8 μm 时,切向磨削力和法向磨削力基本保持不变。

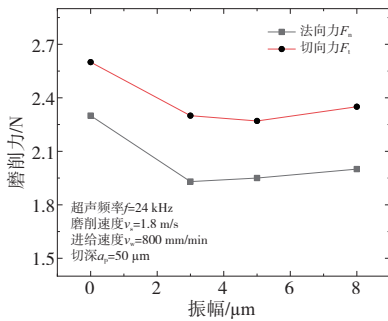


图6 振幅对磨削力的影响

2.2 表面粗糙度

不同振动频率与振幅下的表面粗糙度的结果分别如图7和图8所示。从图7中可以看出,在相同振幅下,表面粗糙度随着超声振动频率的增大而减小。和普通磨削相比,24 kHz、40 kHz 和 65 kHz 超声振动辅助磨削后的表面粗糙度分别下降 10%、12.2% 和 23%。从图8中可以看出,在试验参数范围内振幅对表面粗糙度影响不大,表面粗糙度在 8.5~9.0 μm 之间,但不同振幅的超声振

动辅助磨削的表面粗糙度均小于普通磨削。

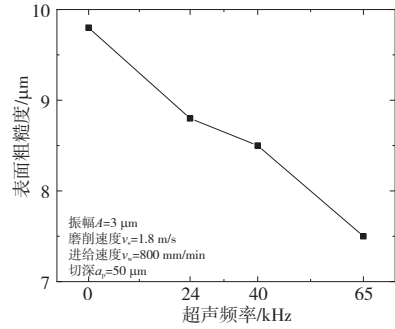


图7 振动频率对表面粗糙度的影响

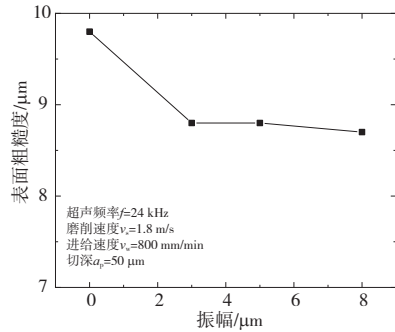


图8 振幅对表面粗糙度的影响

2.3 磨削表面微观形貌

图9是普通磨削和不同振动频率下超声振动辅助磨削后的表面微观形貌。从图中可以看出在不同的振动频率下, SiC 纤维主要的去除形式都为阶梯型脆性断裂,且阶梯状脆性断裂的边界形貌为不规则曲线。定义相邻两条阶梯状脆性断裂的边界距离为 Δl 。从图9中可以看出,普通磨削下的 Δl 约为 133 μm , 24 kHz 超声振动辅助磨削下的 $\Delta l = 92 \mu\text{m}$, 40 kHz 超声振动辅助磨削下的 $\Delta l = 64 \mu\text{m}$, 65 kHz 超声振动辅助磨削下的 $\Delta l = 50 \mu\text{m}$ 。不同振动频率下超声振动辅助磨削下的 Δl 小于普通磨削,且 Δl 随着振动频率的增大而减小。

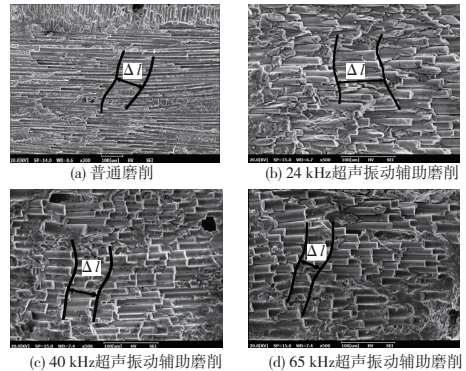


图9 普通磨削和不同振动频率下超声振动辅助磨削后的表面微观形貌

同时对磨削过程中产生的磨屑进行分析,测量磨屑中纤维的平均长度,结果如图 10 所示。

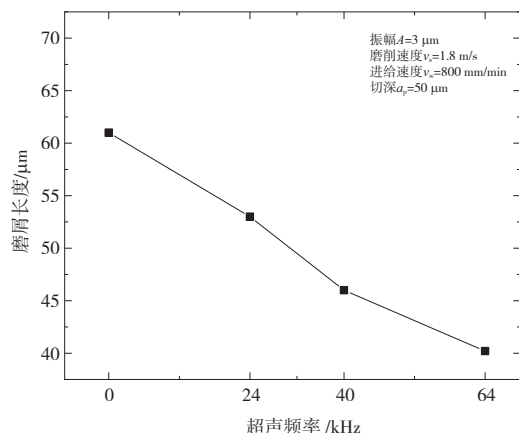


图 10 不同频率下的超声振动辅助磨削产生的磨屑平均长度

从图 10 中可以看出,与普通磨削相比,在 24 kHz、40 kHz、65 kHz 频率下,磨屑中纤维的平均长度分别减小 12.4%、23.6% 和 33.9%。这与图 9 中 Δl 的变化趋势相符。这是因为在普通磨削加工中,磨粒对 SiC_f/SiC 纤维的去除方式为连续挤压作用和剪切作用, SiC_f/SiC 纤维弯曲变形,当挤压应力大于 SiC_f/SiC 纤维的断裂强度时, SiC_f/SiC 纤维发生折断,且折断后的 SiC_f/SiC 纤维尺寸较长,从而 SiC_f/SiC 纤维束的层状脆性断裂尺寸 Δl 较大。在超声辅助磨削加工中,由于超声振动的引入,加强了磨粒对工件表面的干涉作用,在超声振动的作用下,磨粒对材料表面具有高频冲击作用,促进 SiC_f/SiC 纤维裂纹的产生和扩展, SiC_f/SiC 纤维变为短纤维被去除,所以超声辅助磨削中 SiC_f/SiC 纤维束的层状脆性断裂尺寸 Δl 减小。且在超声振动辅助磨削的过程中,磨粒对工件表面的干涉作用随着振动频率的增大而增大,因此 Δl 随着振动频率的增大而减小。

3 结语

1) 不同振动频率和振幅下的超声振动辅助磨削的磨削力均小于普通磨削。增大振动频率可以有效地降低磨削力,振幅的增大对磨削力的影响不大。

2) 超声振动辅助磨削可降低表面粗糙度,表面粗糙度随着振动频率的增大而减小,但不同振幅下表面粗糙度差异不大。

3) 超声振动辅助磨削和普通磨削的材料去除形式均为阶梯型脆性断裂,且阶梯状脆性断裂的边界形貌为不规则曲线,相邻两条阶梯状脆性断

裂的边界距离随着振动频率的增大而减小。

参考文献:

- [1] 张立峰. 陶瓷基复合材料界面强度与磨削过程材料去除机理研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [2] AN Q L, CHEN J, MING W W, et al. Machining of SiC ceramic matrix composites: a review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 540-567.
- [3] 文章苹, 张骋, 张永刚. 碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展及应用[J]. 人造纤维, 2018, 48(1): 18-24.
- [4] 王晶, 成来飞, 刘永胜, 等. 碳化硅陶瓷基复合材料加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(15): 50-56.
- [5] ZHANG L F, WANG S, LI Z, et al. Influence factors on grinding force in surface grinding of unidirectional C/SiC composites [J]. Applied Composite Materials, 2019, 26(3): 1073-1085.
- [6] YIN J, XU J, DING W, 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(9): 12795-12802.
- [7] DING K, LI Q L, ZHANG C D. Experimental studies on material removal mechanisms in ultrasonic assisted grinding of SiC ceramics with a defined grain distribution brazed grinding wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(11/12): 3663-3676.
- [8] HUANG B, WANG W H, JIANG R S, et al. Experimental study on ultrasonic vibration-assisted drilling micro-hole of SiC_f/SiC ceramic matrix composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(11): 8031-8044.
- [9] 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): 3095-3105.
- [10] LI D G, TANG J Y, CHEN H F, et al. Study on grinding force model in ultrasonic vibration-assisted grinding of alloy structural steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5/6/7/8): 1467-1479.
- [11] MALKIN S, GUO C S. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives [M]. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008.

收稿日期: 2022-12-14