

高体积分数 SiC_p/Al 复合材料超声 辅助划切微观去除机理

张红哲¹, 朱晓春¹, 鲍永杰²

(1.大连理工大学 工程训练中心, 辽宁 大连 116023;
2.大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: **目的** 揭示高体积分数 SiC_p/Al 复合材料在超声辅助加工条件下的材料去除机理。**方法** 采用 SiC_p/Al 复合材料的超声辅助划切试验, 探究划切参数变化对超声振幅、划切力及摩擦因数的影响规律, 并通过扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜对划痕表面微观形貌进行观察, 分析单点金刚石磨粒工具超声辅助划切材料去除的特点。**结果** 随着划切深度从 0.01 mm 增加到 0.05 mm, 电流值逐渐降低, 电流值变化量从 12 mA 增加到 25 mA, 超声振幅逐渐衰减, 金刚石压头的轴向冲击作用减弱。划切深度和划切速度的增加使切向挤压切削作用增强, 划切力和摩擦因数增大。在材料去除过程中, 碳化硅颗粒存在破碎成小颗粒、剪切断裂破碎和拔出等多种去除形式, 铝基体出现明显的塑性流动和涂覆现象, 并形成切削沟槽外侧堆积。**结论** 当切削深度和进给速度较小时, 材料去除主要是在轴向的高频振动冲击作用下完成, 材料表面加工质量较好; 当切削深度和进给速度逐渐增大时, 材料去除是在轴向冲击破碎和切向挤压切削共同作用下完成, 材料表面加工质量逐渐降低。

关键词: SiC_p/Al 复合材料; 超声辅助划切; 去除机理; 表面形貌; 表面损伤

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0327-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.031

Microcosmic Removal Mechanism in Ultrasonic Assisted Scratch of High-volume Fraction SiC_p/Al Composites

ZHANG Hong-zhe¹, ZHU Xiao-chun¹, BAO Yong-jie²

(1. Engineering Training Center, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116023, China;
2. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026, China)

ABSTRACT: The material removal mechanism of the high-volume fraction SiC_p/Al composites in ultrasonic assisted

收稿日期: 2022-02-28; 修订日期: 2022-04-02

Received: 2022-02-28; Revised: 2022-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(51875079); 辽宁省兴辽英才计划(XLYC1907196); 国家自然科学基金联合基金(U1908228)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875079); the Talent Plan of Liaoning Province (XLYC1907196); Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U1908228)

作者简介: 张红哲(1970—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为复合材料先进制造技术。

Biography: ZHANG Hong-zhe (1970-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: advanced manufacturing technology of composites.

通讯作者: 鲍永杰(1980—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复合材料加工及其自动化。

Corresponding author: BAO Yong-jie (1980-), Male, Doctor, Professor, Research focus: processing and automation of composite materials.

引文格式: 张红哲, 朱晓春, 鲍永杰. 高体积分数 SiC_p/Al 复合材料超声辅助划切微观去除机理[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 327-335.

ZHANG Hong-zhe, ZHU Xiao-chun, BAO Yong-jie. Microcosmic Removal Mechanism in Ultrasonic Assisted Scratch of High-volume Fraction SiC_p/Al Composites[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 327-335.

machining was elucidated by ultrasonic assisted scratch experiment. The influence of scratching parameters on the ultrasonic amplitude, scratching force and friction coefficient were investigated by the experiment. The morphology of the scratch grooves was observed with the scanning electron microscope and the laser confocal microscopy. Further, the characteristics of ultrasonic assisted machining was analyzed by ultrasonic assisted scratch experimental date. The experimental results show that the current value decreases gradually with the increase of scratching depth from 0.01 mm to 0.05 mm, the change amount of current value raises from 12 mA to 25 mA, the ultrasonic amplitude decreases gradually, the axial impact of diamond indenter weakens; the extrusion cutting effect of tangential direction is enhanced with the increase of scratching depth and scratching speed, the scratching force and friction coefficient are improved. During the process of scratch, the SiC particles are broken into small particles, sheared fracture and some SiC particles are pulled out. The aluminum matrix appears obvious plastic flow and coating phenomenon, forming the accumulation outside the scratch grooves. Thus, when the cutting depth and feed speed are small, the material removal is mainly completed by the action of axial high-frequency vibration impact, the quality of the machining surface is higher; when the cutting depth and feed speed gradually increase, the material removal is completed by the combined action of axial impact crushing and tangential extrusion cutting, the quality of machining surface is gradually worse.

KEY WORDS: SiC_p/Al composites; ultrasonic-assisted scratching; removal mechanism; surface morphology; surface damage

碳化硅颗粒增强铝基复合材料（简称 SiC_p/Al 复合材料）属于金属基复合材料的一种，具有较高的比强度和比模量、耐高温、耐磨损、耐疲劳、较小的热膨胀系数、较好的尺寸稳定性等优异的物理和力学性能，被广泛用在航空航天、电子封装、精密光学等领域^[1-3]。然而该材料组成相的物理和力学性能差异巨大，铝合金基质地较软且延展性较好，而碳化硅颗粒材质偏硬并呈脆性，大量的不规则碳化硅颗粒在铝合金基体中非均匀分布，导致材料在加工过程中切削力频繁发生突变，材料内部出现组成相变形不一致的现象^[4]。采用传统的加工工艺对 SiC_p/Al 复合材料进行加工时，工件表面极易产生多种形式的加工损伤，如凹坑、裂纹、二次划伤、基体损伤、崩边损伤等^[5-7]，严重影响 SiC_p/Al 复合材料产品的精度与表面质量。同时，随着碳化硅颗粒体积分数的增加，材料的强度和刚度提高，材料的硬脆性逐渐增强，导致工件表面加工损伤和刀具磨损更加严重。因此，对于高体积分数 SiC_p/Al 复合材料的加工尤为困难^[8-9]，严重制约了 SiC_p/Al 复合材料在航空航天等重要领域的进一步推广应用。

超声辅助加工是一种高效的特种加工方法，是在传统铣磨加工的基础上引入轴向超声振动，对于陶瓷、玻璃、碳化硅等硬脆难加工材料的加工具有独特的优势^[10-11]。由于传统加工工艺存在一定的局限性，在高体积分数 SiC_p/Al 复合材料的加工中引入超声振动辅助是提高复合材料切削性能的有效方法^[12-14]，可以显著降低切削力，减少加工损伤，提高硬脆材料的加工质量和材料去除率等^[15]。Dong 等^[16]开展了超声辅助磨削与传统磨削加工的对比试验研究，试验结果显示，超声辅助磨削加工可以降低 SiC_p/Al 复合材料的亚表面损伤层厚度，并有效抑制加工刀具的磨损。Sanda 等^[17]开展了碳纤维增强复合材料超声辅助钻孔试验，研究发现采用超声辅助钻削加工工艺可以减少

分层，降低钻削温度，显著提高孔的加工质量。Xiang 等^[18]利用有限元仿真方法对 SiC_p/Al 复合材料的切削过程进行研究，发现超声振动可以有效抑制碳化硅颗粒的破碎，减缓裂纹的扩展，提高工件已加工表面的质量。同时，因为轴向超声振动的加入，刀具的实际运动轨迹和材料的加工特点均发生了改变，所以材料的去除机理不同于传统加工^[12]。

单颗粒金刚石划切试验可以简化切削过程，直观反映刀具与材料之间的实际相互作用，是常用的揭示材料加工特点和去除机理的试验方法^[19]。Feng 等^[20]通过超声辅助划切试验对 SiC_p/Al 复合材料的材料去除特性进行研究，发现碳化硅颗粒的主要去除形式是脆性去除，在轴向冲击作用下碳化硅颗粒变成碎小颗粒，然后被去除。Cao 等^[11]对超声辅助加工条件下碳化硅陶瓷的材料去除机理进行研究，结果显示，在划切过程中存在 3 种不同的材料去除模式：塑性去除、脆性去除和脆塑性转变。在这些研究的基础上，Zha 等^[12]对 SiC_p/Al 复合材料的 3 种材料去除过程进行了分析，包括刀具只切削铝基体、刀具只切削碳化硅颗粒和刀具从铝基体划切到碳化硅颗粒或者刀具从碳化硅颗粒划切到铝基体。尽管目前针对超声辅助加工中 SiC_p/Al 复合材料的材料去除机理已经有了部分研究，但只考虑了将材料去除归因于轴向的高频振动冲击作用，并未涉及切向方向上的挤压切削作用。然而材料去除与切向挤压切削作用密不可分，在超声振动辅助加工条件下，综合考虑轴向高频振动冲击作用和切向挤压切削作用对材料去除的影响，对复合材料的微观去除机理进行揭示，是降低复合材料表面损伤、实现复合材料表面高质量加工的关键。

本文针对 65%高体积分数 SiC_p/Al 复合材料开展超声辅助划切试验研究，通过不同划切参数下超声振幅、划切力及摩擦因数的变化特点，对金刚石颗粒与材料的实际相互作用进行研究，最后根据不同划切参

数下金刚石颗粒与材料的相互作用变化规律, 揭示超声辅助加工条件下 SiC_p/Al 复合材料的微观去除机理。

1 SiC_p/Al 复合材料超声辅助划切试验

1.1 材料、刀具和试验设备

超声辅助划切试验采用碳化硅颗粒体积分数为 65% 的 SiC_p/Al 复合材料, 其中碳化硅颗粒的平均直径为 40 μm。试验所用工件尺寸为 26 mm×16 mm×2 mm。采用如图 1 所示的金刚石压头作为划切试验所用刀具, 刀具由四棱台形金刚石颗粒和特殊锥柄经钎焊制成。采用激光位移传感器测量超声振动作用下刀具的实际空载振幅。

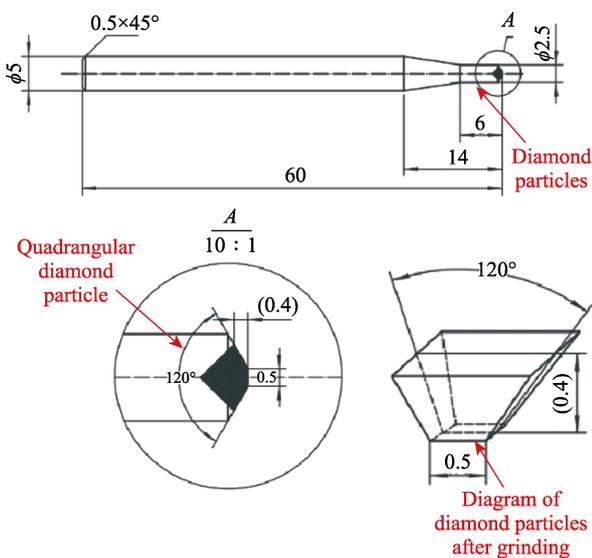


图 1 金刚石刀具结构示意图
Fig.1 Diamond cutter structure diagram

超声辅助划切试验在自行研制的复合材料钻铣试验台上进行, 试验台主要由数控加工系统和超声振动系统两部分构成。超声辅助划切试验装置如图 2 所示, 工件用石蜡固定在工件夹具表面, 工件夹具固定在三向测力仪 (Kistler9257b) 上, 测力仪固定在试验台工作台上。测力仪连接电荷放大器 (LN5861)、

数据采集卡 (USB1902) 和计算机, 可以将划切力信号转化为电压信号, 用来记录试验过程中的划切力。用 ER16 弹簧卡头将划切刀具安装在超声主轴上, 通过控制超声系统电源的频率、功率百分比和金刚石压头刀具的实际伸出长度来控制刀具实际振动的频率和幅值。

1.2 试验设计

1.2.1 试验准备阶段

1) 超声振幅的调试和测量。超声振幅对于划切试验是一个很重要的参数, 因此需要对试验前的空载超声振幅和试验中实际振幅进行测量。对于划切试验前的空载振幅, 可以采用激光位移传感器进行测量。将划切刀具安装在超声主轴上后, 调整刀杆伸出长度、功率百分比和初始频率, 使刀具稳定振动后进行测量, 测得实际空载振幅最大值为 10 μm, 频率约为 32.8 kHz, 初始电流值为 135 mA, 测量装置如图 3 所示。划切试验中的实际超声振幅难以直接测量, 可通过超声电源电流值的变化来间接反映。由公式 (1) 可知超声振幅 A 与超声电源电流值 I 呈线性正相关关系^[21], 因此在划切试验正式开始后, 通过记录每次划切过程中超声电源电流值的变化来反映实际振幅的变化。

$$A = aI + b \tag{1}$$

2) 工件表面的前处理。将 SiC_p/Al 复合材料工件用石蜡粘到夹具上, 夹具为带有沉头孔的钢板, 双面磨削保证平行度, 夹具用内六角螺钉固定到测力仪上, 测力仪固定到工作台上。为保证试验的精度, 工件一次装夹, 直至试验结束。用树脂基金刚砂砂轮在极小切深下反复抛光 SiC_p/Al 复合材料工件的上表面。采用千分表测试工件上表面的平行度, 确保工件上表面水平度在 0.001 mm 以内。

1.2.2 试验过程

1) 本次超声辅助划切试验主要针对 SiC_p/Al 复合材料在超声辅助磨削加工中的材料微观去除机理进行研究, 划切深度和划切速度对应的是实际加工中的切削深度和进给速度, 因此划切速度选择范围为 10~

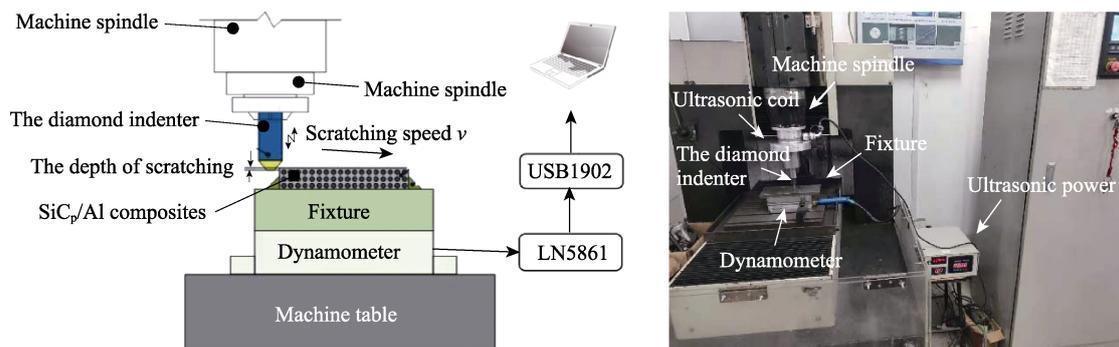


图 2 划切试验装置
Fig.2 Diagram of scratching cutting test device

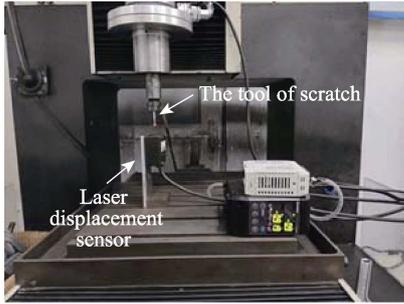


图3 测量装置
Fig.3 Measuring device diagram

50 mm/min, 划切深度选择范围为 0.01~0.05 mm^[22], 试验参数如表 1 所示。在稳定的空载振幅下, 采用不同的划切深度和划切速度进行单次定切深的划切试验, 每组共进行 10 次试验, 得到 10 条划痕, 同时为确保试验数据的可靠性, 单次试验重复 3 次。每组试验测量切向力 F_y 和轴向力 F_z (轴向方向 z 指的是垂直于工件表面的方向, 切向方向 y 指的是水平面内平行于划痕的方向, 法向方向 x 指的是水平面内垂直于划痕的方向), 同时记录实时电流值 I 。

2) 试验完成后, 用激光共聚焦显微镜扫描划痕轮廓形貌, 每隔一段间距对划痕截面轮廓进行扫描测量, 测量方法如图 4 所示, 使用扫描电镜观察划痕表面微观形貌。

表 1 试验参数
Tab.1 Test parameters table

Number	Scratching speed/(mm·min ⁻¹)	Scratching depth/mm
1	30	0.01
2	30	0.02
3	30	0.03
4	30	0.04
5	30	0.05
6	10	0.03
7	20	0.03
8	40	0.03
9	50	0.03
10	50	0.05

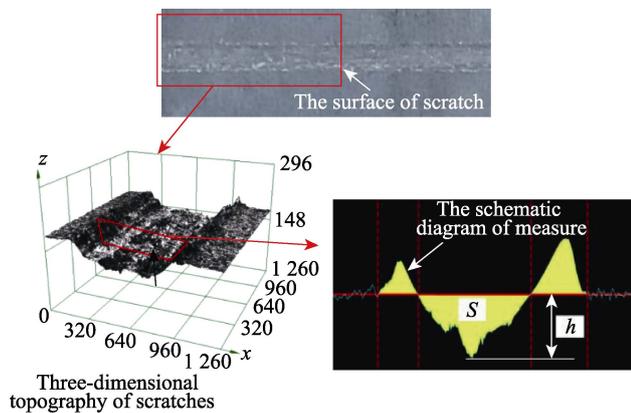


图4 划痕轮廓参数测量方法
Fig.4 Measurement method of scratching profile parameters

2 结果与分析

在超声辅助划切试验中, 金刚石压头的实际运动轨迹为简谐波正弦曲线, 其可简化分解为两部分: 一部分是沿着轴向方向上的周期性高频超声振动, 另一部分是沿着切向方向上的匀速运动。因此, 工件表面材料的去除与轴向高频振动冲击作用和切向挤压切削作用密切相关。在实际划切过程中, 划切深度和划切速度的变化对金刚石压头与材料的实际相互作用会产生影响, 从而引起超声振幅、划切力和摩擦因数的规律性变化, 材料的微观去除机理也因此发生改变。通过对不同划切参数下超声振幅、划切力及摩擦因数的变化特点进行分析, 可以阐明划切过程中金刚石颗粒与材料实际相互作用的变化规律。

2.1 超声振幅

在超声辅助划切试验中, 轴向方向上的超声振幅影响着金刚石颗粒与材料的实际相互作用, 进而影响材料的去除效率和去除形式。而影响超声振幅的主要因素有刀柄的质量、刀柄的形状、切削参数、超声功率百分比、刀具伸出量等。本次试验中主要研究划切参数对超声振幅的影响, 因此将划切参数以外的其他因素保持不变, 排除其他因素对超声振幅的影响。在单次划切试验中, 取稳定划切状态时的超声电源电流值作为该组划切参数下的电流值, 并与空载时刻的电流值做差值得到电流值变化量。通过对划切试验所得到的电流 (图 5) 进行分析, 可明显看出在单因素划切试验中, 随着划切深度从 0.01 mm 增加到 0.05 mm, 电流值逐渐降低, 电流值变化量从 12 mA 增加到 25 mA, 而划切速度的变化对电流值并没有产生显著性的影响, 电流值曲线只是出现了微小的波动。依据公式 (1) 可知, 随着划切深度的增加, 超声振动幅值逐渐降低, 超声振幅发生了一定程度的衰减, 则金刚石压头在轴向方向上的冲击作用也会随之减弱; 而划切速度的增加并没有对超声振幅产生较大的影响。同时在单次划切试验中, 电流值处于不断地变化当中, 这是由于金刚石压头在划切碳化硅颗粒过程中, 随着大量随机分布的碳化硅颗粒的破裂与崩碎, 切削力会发生瞬时突变^[20], 导致超声振幅实时变化, 电流值也因此处在不断变化之中。

2.2 划切力

由于切削力与材料的实际去除状态密切相关, 因此通过对切削力的研究可以帮助揭示超声辅助划切状态下材料的去除机理。从图 6 中可以看出, 法向划切力在 0 刻度线左右波动, 其数值大小明显低于轴向划切力 F_z 和切向划切力 F_y , 因此重点研究 F_y 和 F_z 的变化。由于在超声辅助划切过程中大量随机分布的碳化硅颗粒发生崩碎破裂, 压头从较软的铝基体划切

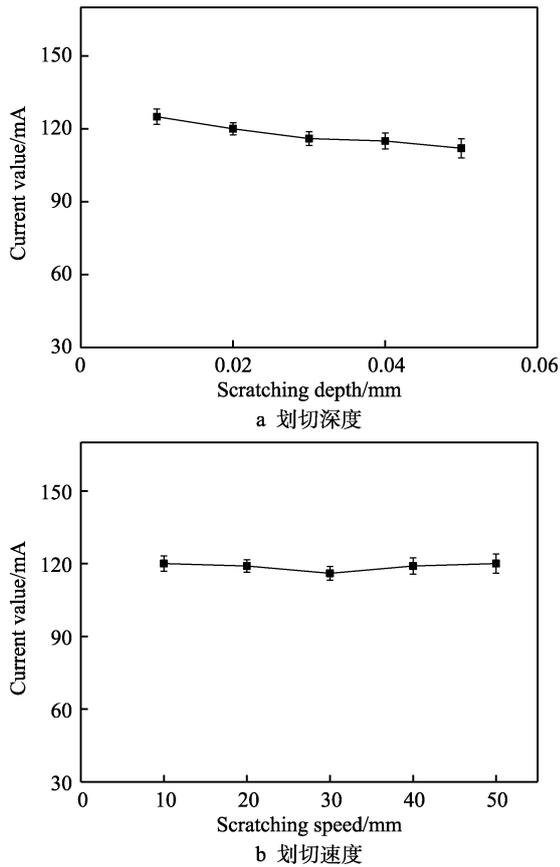


图 5 划切参数对电流值的影响
Fig.5 Influence of scratching parameters on current value: a) scratching depth; b) scratching speed

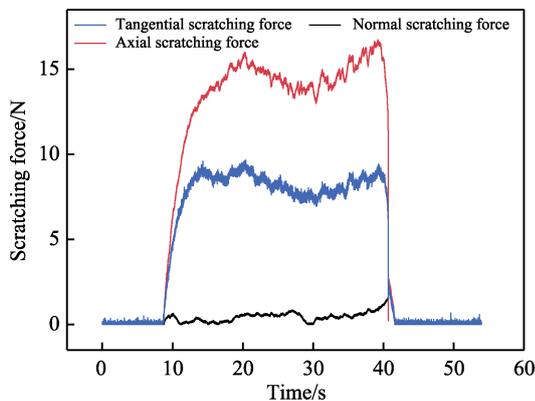


图 6 单条划切路径下划切力的变化曲线
(划切深度为 0.03 mm, 划切速度为 40 mm/min)
Fig.6 Variation of scratching force in single scratch
(a scratching depth 0.03 mm, scratching speed 40 mm/min)

到较硬的碳化硅颗粒会导致划切力发生突变, 同时材料的主要去除形式由传统切向方向上的划擦、耕犁和切削转变为轴向高频振动冲击去除^[12], 因此 F_y 和 F_z 表现为高频的波动状态且 F_z 显著大于 F_y , 如图 6 所示。图 7 显示了不同划切参数下 F_y 与 F_z 的变化曲线, 从图中可以看出, 随着划切深度和划切速度的增加, F_z 和 F_y 分别逐渐增加, 且 F_z 与 F_y 的差值不断减小, 分别减小了 36.8% 和 12.9%。这是由于随着划切深度

和划切速度的增加, 材料去除面积不断增加, F_y 与 F_z 逐渐增大。同时切向切削面积的增加使材料变形力和摩擦力增大, F_y 与 F_z 的差值不断减小, 切向挤压切削作用不断增强。

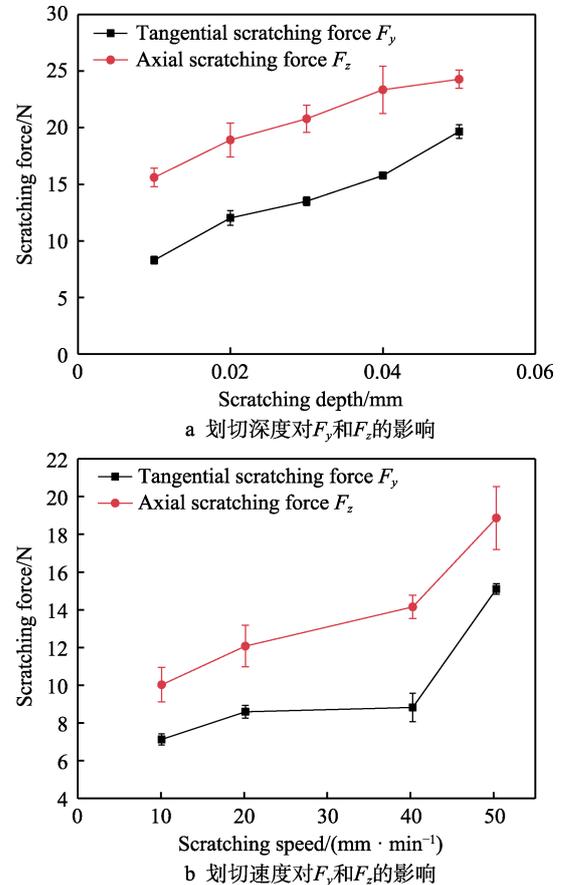


图 7 划切参数对划切力的影响
Fig.7 Influence of scratching parameters on scratching force: a) the effect of cutting depth on F_y and F_z ; b) the effect of cutting speed on F_y and F_z

2.3 摩擦因数

根据库伦摩擦定律, 将切向划切力 F_y 和轴向划切力 F_z 的比值定义为摩擦因数^[20]。如图 8 所示, 随着划切深度和划切速度的增加, 摩擦因数均出现了不同程度的增大, 且当划切深度超过 0.04 mm、划切速度超过 40 mm/min 时, 摩擦因数出现了大幅度的增大。这是因为随着划切深度和划切速度的增加, 划痕切向方向上的挤压切削变形不断加强, 如图 9 中不同划切参数下划痕出口宽度的变化所示, 挤压切削作用的不断增强导致出口变形明显增大。同时, 轴向方向上超声振幅发生了一定程度的衰减, 轴向方向上的周期性冲击作用减弱, 压头前部与材料的接触不断扩大, 摩擦因数因此不断增大, 压头与材料表面的相互摩擦作用增强, 导致原本光滑的铝基体涂覆表面出现了大量的划痕。

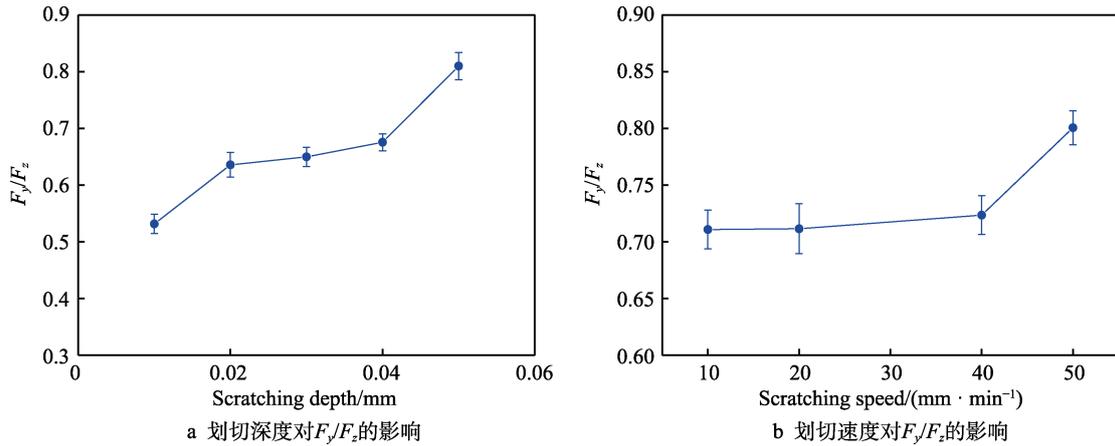
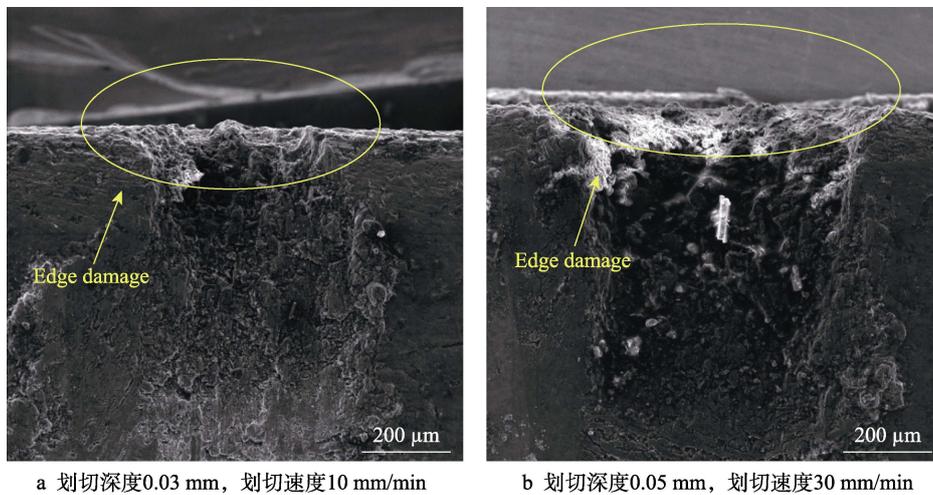


图8 摩擦因数的变化曲线

Fig.8 Variation of friction coefficient: a) the effect of cutting depth on F_y/F_z ; b) the effect of cutting speed on F_y/F_z



a 划切深度0.03 mm, 划切速度10 mm/min

b 划切深度0.05 mm, 划切速度30 mm/min

图9 边缘损伤形貌

Fig.9 Edge damage diagram: a) cutting depth 0.03 mm, cutting speed 10 mm/min; b) cutting depth 0.05 mm, cutting speed 30 mm/min

3 SiC_p/Al 复合材料的材料去除机理

在切削加工过程中,材料的去除是在刀具与材料的持续相互作用下完成,因此利用金刚石压头与材料的实际相互作用变化规律,可以揭示材料的微观去除机理。在超声辅助划切过程中,碳化硅颗粒之所以可以实现高效去除,很大程度上是因为压头的轴向高频振动冲击作用为碳化硅颗粒内部裂纹形成与扩展提供了大量的轴向能量^[12,21,23]。而从上述试验结果分析可知:随着划切深度和划切速度的提高,轴向超声振幅逐渐衰减,金刚石压头在轴向方向上的高频振动冲击作用逐渐减弱,切向方向上划切力和摩擦因数不断增加,切向方向挤压切削作用显著增强,此时超声辅助划切和普通划切的差异趋于减小。由于划切参数的改变,金刚石压头与材料之间的相互作用出现了显著差异,材料的微观去除机理也因此发生改变。所以根据切削深度和进给速度的大小,将 SiC_p/Al 复合材料的表面材料微观去除机理分为以下两部分进行分析讨论。

1) 当切削深度和进给速度较小时, SiC_p/Al 复合材料的材料去除主要是在轴向高频振动冲击作用下完成,压头切向方向的挤压切削只起辅助作用。如图 10 所示,在划切过程中,金刚石压头沿着简谐波正弦曲线运动轨迹对材料表面进行轴向周期性高频振动冲击,压头与碳化硅颗粒的接触应力瞬间达到碳化硅颗粒的断裂极限应力,根据压痕断裂力学理论,碳化硅材料在外载荷作用下,会在接触位置处产生中位裂纹和横向裂纹,并随着冲击作用的进行,裂纹扩展到碳化硅内部,碳化硅颗粒破碎成较小颗粒^[21,23]。破碎之后的碳化硅小颗粒随着压头的切向进给运动从表面被去除,破碎之后的碳化硅颗粒表面如图 11a 所示。同时铝基体在轴向冲击和切向进给作用下发生塑性流动,一部分在划痕两侧发生堆积,而另一部分流动到压头下方,受压头的耕犁作用而涂覆在划痕表面,碳化硅颗粒表面形成薄薄的铝基体覆盖层,如图 11b 所示。划痕表面整体相对光滑,没有凹坑、剪切撕裂等加工损伤,微观形貌较好,加工质量较好,如图 11c 所示。

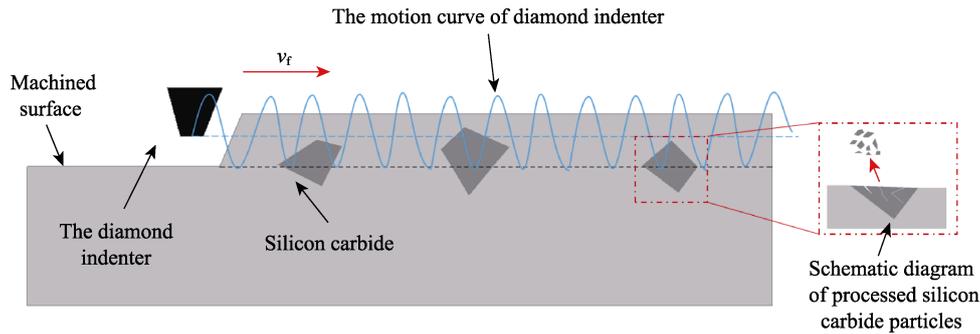
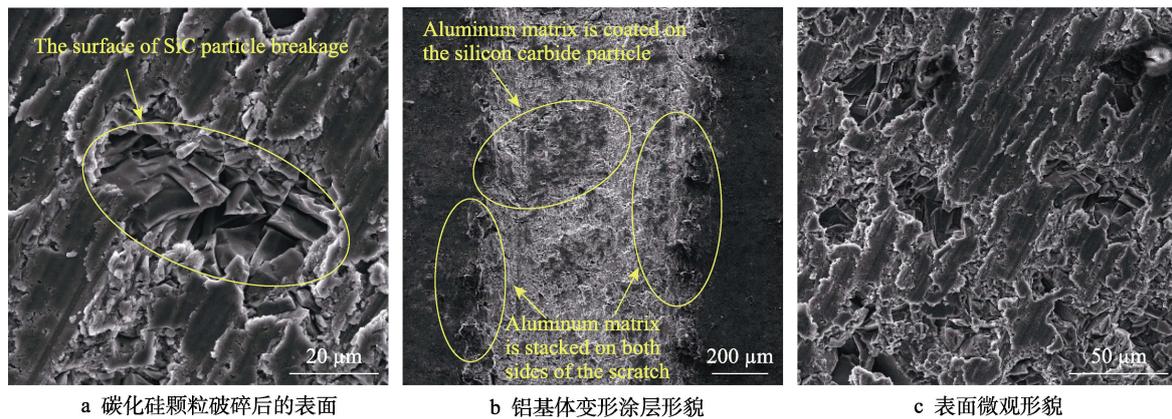


图 10 划切参数小于临界值时的材料去除示意图

Fig.10 Diagram of material removal when the cutting parameter is less than the critical value



a 碳化硅颗粒破碎后的表面

b 铝基体变形涂层形貌

c 表面微观形貌

图 11 划痕表面微观形貌 (划切深度 0.01 mm, 划切速度 30 mm/min)

Fig.11 Microtopography of scratching surface (scratching depth 0.01 mm, scratching speed 30 mm/min): a) the surface of the silicon carbide particles is broken; b) aluminum matrix deformation coating; c) surface microtopography

2) 当切削深度和进给速度逐渐增大时, SiC_p/Al 复合材料的材料去除是在轴向冲击破碎和切向挤压切削共同作用下完成。随着划切深度和划切速度的提高, 压头轴向方向上的冲击作用减弱, 但此时切向方向上的挤压切削作用增强, 金刚石压头和碳化硅颗粒之间会发生更加激烈的相互作用。由于具有较低断裂韧性的碳化硅颗粒在铝基体内非均匀分布, 因此在划切过程中碳化硅颗粒的去除方式可能同时存在多种形式^[24]。根据金刚石压头与碳化硅颗粒之间的相对位置, 去除形式主要分为 4 种: 压头与碳化硅颗粒尚未接触、压头与碳化硅颗粒上部接触、压头与碳化硅颗粒中间部分接触和压头与碳化硅颗粒底部接触。图 12 给出了这几种去除形式的示意图。当压头与碳化硅颗粒尚未接触 (图 12, 位置 1) 时, 碳化硅颗粒在已加工表面水平面下方, 压头未接触到碳化硅颗粒, 只对铝基体进行切削。由于压头受轴向超声振幅衰减的影响, 压头与材料表面之间的间隙增大, 较小的碳化硅颗粒碎屑也可从间隙中流出, 因此压头与材料表面之间的摩擦因数增大, 如图 8 所示, 压头与材料表面相互摩擦作用的增强也导致碳化硅颗粒碎屑在流过铝基体表面时会发生铝基体表面发生塑性变形, 留下明显的划痕, 如图 13a 所示。同时受压头切向方向挤压切削作用增强的影响, 铝基体的塑性变形增大, 变形抗力做功增多, 此时的摩擦因数增高, 摩擦做功

也增大, 因此切削区域的温度升高, 铝基体受热软化, 塑性流动进一步增强, 其在划痕表面的涂覆作用也会加强。当压头与碳化硅颗粒上部接触 (图 12, 位置 2) 时, 碳化硅颗粒在已加工表面水平面以上部分的体积大约是其总体积的 1/4, 体积较小的接触部分在压头轴向冲击作用下产生裂纹, 裂纹迅速扩展形成局部破碎, 加工后表面如图 13b 所示, 碳化硅颗粒与压头接触面以上部分以这样的形式被脆性去除。当压头与碳化硅颗粒中间部分接触 (图 12, 位置 3) 时, 碳化硅颗粒在已加工表面水平面以上部分的体积大约占其总体积的 1/4~3/4。受轴向冲击作用减弱和切向挤压切削作用增强的影响, 切削区域的碳化硅颗粒在剪切应力、拉应力和轴向冲击的复合作用下产生裂纹, 碳化硅颗粒上部局部区域破碎成小颗粒, 而在中部位置发生剪切断裂, 表面留下粗糙断面, 如图 13c 剪切断面图所示。当压头与碳化硅颗粒的底部接触 (图 12, 位置 4) 时, 碳化硅颗粒在已加工表面水平面以上部分的体积大约占其总体积的 3/4 以上, 因此碳化硅颗粒的大部分体积已经在已加工表面水平面上方, 碳化硅颗粒与铝基体之间的接触面积较小, 界面结合力也比较小。在轴向冲击和切向挤压双重作用下, 碳化硅颗粒部分区域破碎成小颗粒, 剩余部分可能发生剪切断裂, 甚至当切向力大于碳化硅颗粒和铝基体的界面结合力时, 碳化硅颗粒也可能会从铝基体中被拔出,

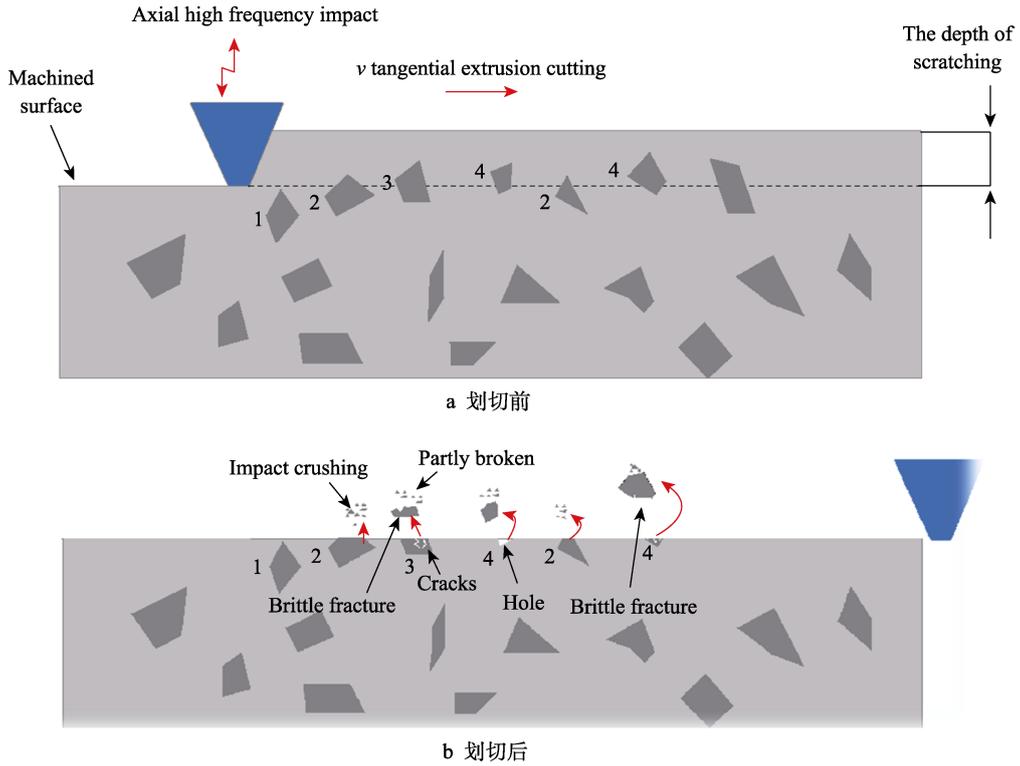


图 12 划切参数大于临界值后的材料去除示意图
 Fig.12 Diagram of material removal when the cutting parameter is greater than the critical value: a) before cut; b) after cut

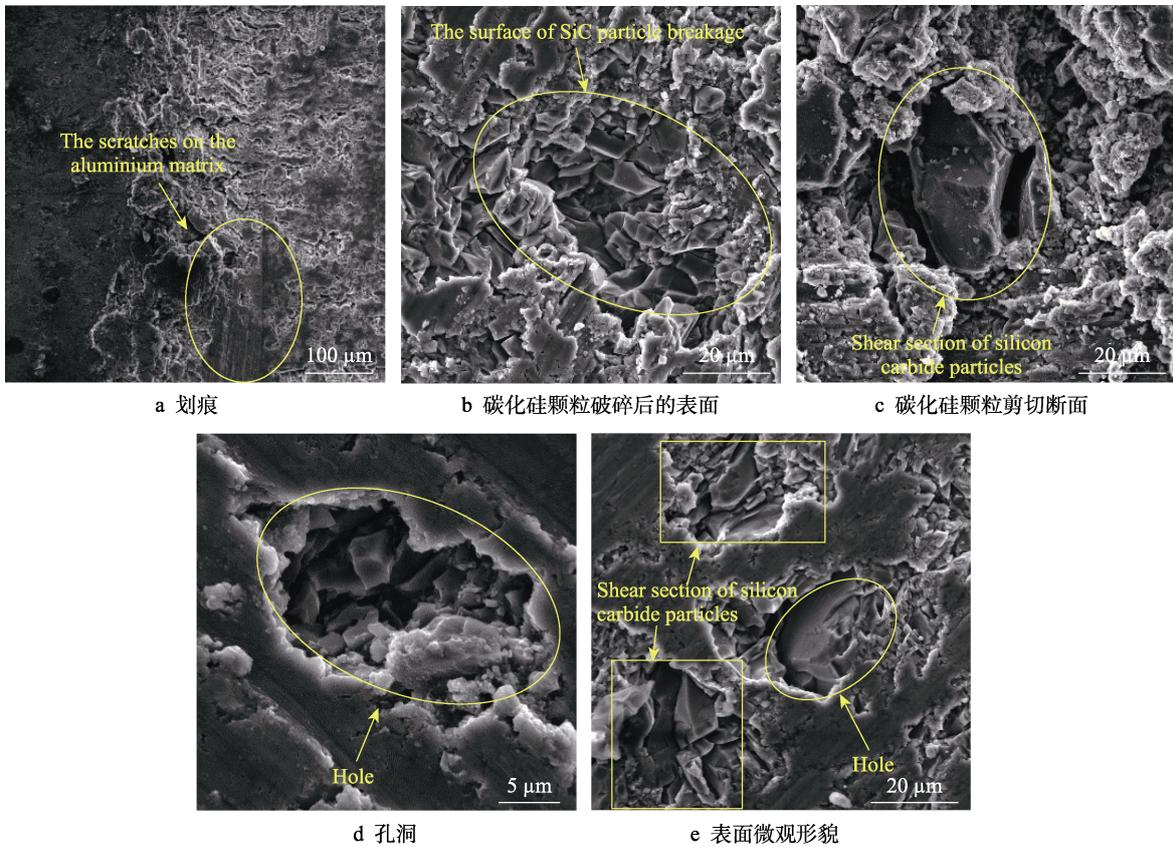


图 13 划痕表面微观形貌 (划切深度为 0.05 mm, 划切速度为 50 mm/min)
 Fig.13 Microtopography of scratch surface (scratching depth 0.05 mm, scratching speed 50 mm/min):
 a) scratch; b) the surface of the silicon carbide particles is broken; c) silicon carbide particles shear cutting surface; d) holes; e) surface microtopography

形成孔洞, 如图 13d 所示。划痕表面大量的孔洞与剪切断面使材料已加工表面质量显著降低, 如图 13e 所示。

通过对高体积分数 SiC_p/Al 复合材料在超声辅助加工条件下材料去除机理的研究可知: 较小的切削深度和进给速度可以更好地发挥超声辅助加工作用的效果, 有效抑制孔洞等表面加工损伤的产生, 获得更高质量的加工表面。而随着切削深度和进给速度逐渐增加, 超声辅助加工作用减弱, 超声辅助加工和普通加工的差异减小, 加工损伤增多, 表面加工质量逐渐降低, 这与众多学者通过加工工艺试验和仿真研究所得到的结论一致^[18,25-26]。因此, 在实际加工应用中, 适当采取较小的切削深度和进给速度可以有效保证超声辅助加工作用的效果, 获得更高质量的加工表面。

4 结论

1) 在超声辅助划切高体积分数 SiC_p/Al 复合材料试验中, 随着划切深度的提高, 超声振动幅值出现一定程度的衰减, 轴向冲击作用逐渐减弱, 而划切速度的提高并没有对超声振幅产生较大的影响。

2) 在超声辅助划切过程中, 材料的主要去除形式已由传统切向方向上的切削去除转变为轴向高频振动冲击去除, 因此轴向划切力 F_z 明显大于切向划切力 F_y 。随着划切深度和划切速度的增加, F_z 、 F_y 和摩擦因数 F_y/F_z 逐渐增大, 切向方向上的挤压切削作用增强。

3) 当切削深度和进给速度较小时, 材料去除主要是在轴向的高频振动冲击作用下完成, 碳化硅颗粒会以小颗粒形式被脆性去除, 材料加工表面质量较好; 当切削深度和进给速度逐渐增大时, 材料去除是在轴向冲击破碎和切向挤压切削共同作用下完成, 碳化硅颗粒由于其材料特性及其在铝基体中随机分布的无序性, 其去除形式可能同时存在多种方式, 如破碎成小颗粒、剪切、断裂破碎和拔出等, 材料表面加工质量显著降低。因此, 在实际加工应用中, 适当采取较小的切削深度和进给速度, 可以有效保证超声辅助加工作用的效果, 获得更高质量的加工表面。

参考文献:

- [1] RAHMAN M H, RASHED H M M A. Characterization of Silicon Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Procedia Engineering, 2014, 90: 103-109.
- [2] XIU Zi-yang, YANG Wen-shu, DONG Rong-hua, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 45vol.% SiC_p/7075Al Composite[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(9): 930-934.
- [3] LU Shi-jin, ZHANG Jun-jie, LI Zeng-qiang, et al. Cutting Path-Dependent Machinability of SiC_p/Al Composite under Multi-Step Ultra-Precision Diamond Cutting[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 241-252.
- [4] ZHOU Li, HUANG Shu-tao, YU Xiao-lin. Machining Characteristics in Cryogenic Grinding of SiC_p/Al Composites[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 27(5): 869-874.
- [5] WANG Tao, XIE Li-jing, WANG Xi-bin, et al. PCD Tool Performance in High-Speed Milling of High Volume Fraction SiC_p/Al Composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12): 1445-1453.
- [6] GE Ying-fei, XU Jiu-hua, FU Yu-can. Surface Quality and Chip Generation Mechanism of SiC_p/Al Composites during High-Speed Milling[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 2(36): 15.
- [7] YU Xiao-lin, HUANG Shu-tao, ZHAO Wen-zhen. Study on Surface Morphology and Chip Formation by High-Speed Milling of High Volume Fraction SiC_p/Al Composites[J]. China Mechanical Engineering, 2010(5): 519.
- [8] CIFTCI I, TURKER M, SEKER U. Evaluation of Tool Wear When Machining SiC_p-Reinforced Al-2014 Alloy Matrix Composites[J]. Materials & Design, 2004, 25(3): 251-255.
- [9] BIAN R, HE N, LI L, et al. Precision Milling of High Volume Fraction SiC_p/Al Composites with Monocrystalline Diamond End Mill[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4): 411-419.
- [10] ZHANG Cheng-long, FENG Ping-fa, WU Z J, et al. Experimental Investigation on Surface Roughness of KDP Crystal Processed with Rotary Ultrasonic Face Milling [J]. Key Engineering Materials, 2012, 499: 223-228.
- [11] CAO Jian-guo, WU Yong-bo, LU Dong, 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.
- [12] ZHA Hui-ting, FENG Ping-fa, ZHANG Jian-fu, et al. Material Removal Mechanism in Rotary Ultrasonic Machining of High-Volume Fraction SiC_p/Al Composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5-8): 2099-2109.
- [13] ZHANG Hong-zhi, KONG Xian-jun, YANG Li-jun, et al. High Temperature Deformation Mechanisms and Constitutive Modeling for Al/SiC_p/45 Metal Matrix Composites Undergoing Laser-Assisted Machining[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 642: 330-339.
- [14] WANG Zhen-long, GENG Xue-song, CHI Guan-xin, et al. Surface Integrity Associated with SiC/Al Particulate Composite by Micro-Wire Electrical Discharge Machining[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(5): 532-539.