

刃口钝圆半径对SiC_p/Al复合材料铣削表面质量和切屑形貌影响研究

高航 牛秋林 戎杰 邱新义 李鹏南

(湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201)

文 摘 碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiC_p/Al)具有卓越的物理力学性能,广泛应用于航空航天、电子、军事等高端领域。本文以体积分数为20%的SiC_p/Al复合材料为研究对象,采用单因素试验方法进行干式铣削,分析刀具刃口钝圆半径和切削速度对切削力、表面形貌、表面粗糙度(*Ra*)和切屑形貌的影响。结果表明:切削力随着刃口钝圆半径的增加而降低,随着切削速度的增加先降低后增加;随着刃口钝圆半径的增加,加工表面的凹坑和犁沟缺陷减少,表面*Ra*呈降低趋势。随着切削速度的增加,加工表面的划痕缺陷增多,表面*Ra*呈现先增加后降低的趋势;在不同刃口钝圆半径和不同切削速度下,切屑形状均呈不规则锯齿状。切屑非自由表面微观形貌随着刃口钝圆半径的增加逐渐变得光滑,随着切削速度的增加出现更严重的裂纹。

关键词 SiC_p/Al复合材料,刃口钝圆半径,切削速度,表面质量

中图分类号: TG506.7

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.05.006

Study on The Influence of The Cutting Edge Radius on The Milling Surface Quality and Chip Morphology of SiC_p/Al Composites

GAO Hang NIU Qiulin RONG Jie QIU Xinyi Li Pengnan

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract SiC particle reinforced aluminum matrix composites (SiC_p/Al) had excellent physical and mechanical properties and were widely used in aerospace, electronics, military and other high-end fields. In this paper, SiC_p/Al composites with a volume fraction of 20% were taken as the research object, and the dry milling test was carried out by using the single factor test method. The effects of the cutting edge radius and the cutting speed on the cutting force, surface morphology, surface roughness(*Ra*) and chip morphology were analyzed. The results show that the cutting force decreases with the increase of the cutting edge radius, and decreases first and then increases with the increase of the cutting speed. With the increase of the cutting edge radius, the pits and furrows on the machined surface decrease, and the *Ra* tends to decrease. With the increase of cutting speed, the scratch defects on the machined surface increase, and the *Ra* increases first and then decreases; Under different cutting edge radius and different cutting speed, the chip shapes appear irregular sawtooth. The micro morphology of non free surface of the chip gradually becomes smooth with the increase of the cutting edge radius, and more serious cracks appear with the increase of the cutting speed.

Key words SiC_p/Al composite, Cutting edge radius, Cutting speed, Surface quality

0 引言

SiC_p/Al复合材料是由铝基体或铝合金基体与硬质SiC颗粒构成的金属基复合材料。因其具有高比强度、高比刚度和良好的耐磨性等优异的物理力学性能,被广泛应用于航空航天、电子封装和汽车制造

等领域^[1]。然而,硬质SiC颗粒在增强SiC_p/Al复合材料物理力学性能的同时,也使其在切削加工过程中产生严重的表面缺陷和刀具磨损^[2-3]。刀具刃口结构显著影响加工表面完整性、刀具磨损和温度分布^[4-5]。刀具刃口与SiC颗粒、基体之间的相互作用

基金项目:国家自然科学基金(52075168、51605161);湖南科技大学科学研究基金(KJ-2042)

第一作者简介:高航,1998年出生,硕士研究生,主要从事难加工材料切削加工方面的研究工作。E-mail: hnustgh@163.com

通信作者:牛秋林,博士,教授,博士生导师,主要从事难加工材料高速切削与超声振动辅助加工方面的研究工作。E-mail: qniu2009@163.com

com

直接影响加工表面质量。因此,开展有关刃口结构对表面质量和切削力的影响研究,对于提高SiC_p/Al复合材料的加工表面质量具有重要意义。近年来,国内外学者针对切削加工SiC_p/Al复合材料的刀具刃口结构进行了广泛的试验研究。

HAN等^[6]采用具有不同刃口结构的聚晶金刚石(PCD)刀具对SiC_p/Al复合材料进行铣削试验,发现具有负倒棱刃口结构的PCD刀具比具有锋利刃口的刀具更利于保护切削刃,负倒棱结构可以有效强化切削刃,然而该结构对于表面质量并没有显著的影响。U. A. DABADE等^[7]分别采用具有修光刃和不具有修光刃的CBN刀片车削SiC_p/Al复合材料。结果表明,具有修光刃结构的刀片能够有效减少表面损伤,降低切削力。A. SCHUBERT等^[8]针对SiC_p/Al复合材料开展车削试验,研究了不同刀尖形状的可转位刀片和后刀面磨损量对表面完整性的影响。结果表明,使用具有修光刃几何形状的刀具可以降低表面Ra,随着刀具后刀面磨损宽度的增加,表面缺陷减少。B. CLAUB等^[9]采用单晶金刚石镶片刀具对SiC颗粒增强铝变形合金EN AW-2017 T4复合材料进行了铣削试验,研究了改进后的刀尖以及不同副切削刃几何形状的影响,发现使用拱形副切削刃结构的刀具可以获得最优的表面质量。

综上所述,目前针对切削加工SiC_p/Al复合材料的刀具刃口结构研究,主要集中在宏观刀具几何形状的切削性能对比及其对表面质量的影响。针对微观刀具刃口结构切削性能的研究较少,同时,缺乏有关刃口结构对切屑形貌的影响方面的深入分析。在SiC_p/Al复合材料切削加工过程中,当刀具刃口钝圆半径与SiC颗粒尺寸相近时,刀具刃口钝圆半径的改变会对工件表面SiC颗粒的去除机制产生重要影响,从而改变切削力、加工表面形貌和切屑形态。因此,开展关于不同刃口钝圆半径的刀具与工件SiC颗粒之间的作用机理研究,深入分析其对切削力、表面质量和切屑形貌的影响规律,对解决SiC_p/Al复合材料与铣削刀具之间的适配性问题、获得铣削加工SiC_p/Al复合材料高质量表面具有重要意义。

为此,针对体积分数为20%的SiC_p/Al复合材料的高品质铣削加工,本文开展不同刃口钝圆半径和不同切削速度下的铣削试验,重点分析刀具刃口钝圆半径与切削速度对切削力、加工表面形貌、表面Ra和切屑形貌的影响,以期加工该材料的刀具刃口结构优化以及切削参数的选择提供实验依据。

1 实验

试验工件为体积分数为20%的SiC_p/Al复合材料,工件尺寸为40 mm × 30 mm × 18 mm,其中SiC颗粒的

平均粒径约为15 μm,基体材料为Al-Zn-Mg-Cu系列超高强度铝合金。在KVC/800/1数控加工中心上进行干式顺铣试验,试验平台如图1所示。刀具采用整体式硬质合金立铣刀(SM-4R-D10.0R0.5),刀具螺旋角为45°,刀尖圆弧半径为0.5 mm,铣刀直径10 mm。

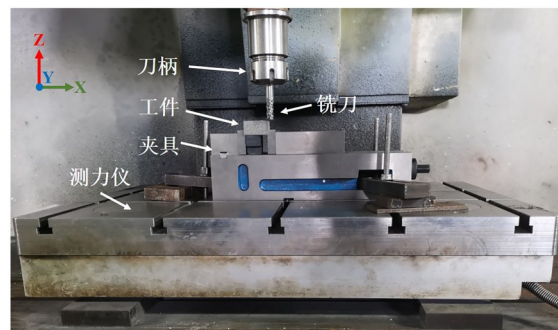


图1 试验平台

Fig. 1 Test Platform

采用单因素试验方法,固定每齿进给量 $f_z = 0.04$ mm/z,轴向切削深度 $a_p = 1$ mm,径向切削宽度 $a_e = 3$ mm,分别采用具有不同刃口钝圆半径的刀具以及不同切削速度进行试验,切削参数如表1所示。试验中采用三向压电式测力平台Kistler925B23进行切削力的采集。采用VHX-500FE超景深显微系统及日立SU3500扫描电子显微镜对切屑形貌和加工表面微观形貌进行观察。采用JITAI820表面Ra仪对加工表面Ra进行测量,测量时随机选取已加工表面5个位置进行测量,然后取平均值作为每组切削参数下的表面Ra值。

表1 试验切削参数

Tab. 1 Test cutting parameters

$f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	a_p / mm	a_e / mm	$v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$r_n / \mu\text{m}$
0.04	1	3	100	5、10、15、20、25
0.04	1	3	60、80、100、120、140	15

2 结果与分析

2.1 切削力

图2显示了不同刃口钝圆半径下的切削力变化趋势。由图可知,随着刃口钝圆半径的增大,切削力呈不断减小的趋势。这与现有的关于刀具刃口钝圆半径的研究结果有所不同,C. F. WYEN等^[10]车削TC4发现,随着刃口钝圆半径的增大,切削力不断增大,其主要原因是犁削力的增大;WU等^[11]也得出了相同的结论,认为随着刃口钝圆半径的增大,切削刃口加工的材料更多,这会导致产生更大的犁削力。然而现有研究大多是针对均质材料进行的,并且切削深度都比较小,这导致刃口钝圆半径的增大会对切削力的增加产生较大的影响。

然而,本文研究对象是包含着硬质颗粒的复合材

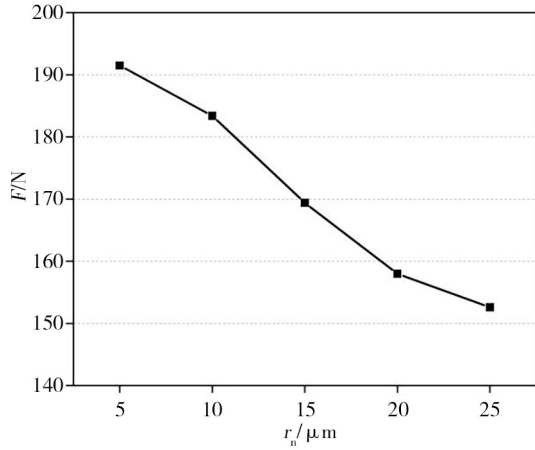
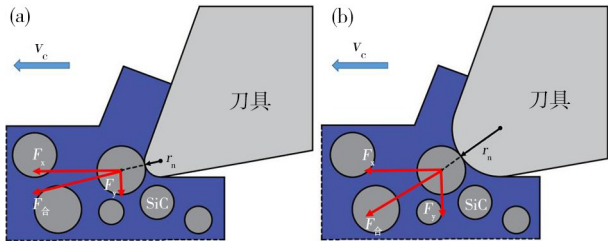


图2 不同刃口钝圆半径下的切削力

Fig. 2 Cutting force under different cutting edge radius

料,且轴向切削深度较大,可以忽略“尺寸效应”的影响,因此可能是由于SiC颗粒去除方式的变化使得切削力不断降低。如图3所示,在相同切削深度下,不同刃口钝圆半径的刀具在切削SiC颗粒过程中,刃口钝圆半径的变化会导致SiC颗粒与刀具刃口的实际接触位置不同,从而SiC颗粒所受切削力方向会发生明显改变。

随着刃口钝圆半径的增大,切削力合力向垂直于切削速度的方向偏转。因此,当刃口钝圆半径较小时,颗粒更容易被直接拔出和耕犁,刀具刃口需要推动整颗的SiC颗粒,这导致了更大的切削力,如图4所示;而当刃口钝圆半径增大时,由于切削力方向的变化,颗粒去除方式逐渐变为破碎后去除,破碎颗粒更多地与切屑一起去掉或者在加工表面进行滑擦。



注:(a)刃口钝圆半径小于颗粒半径;(b)刃口钝圆半径大于颗粒半径。

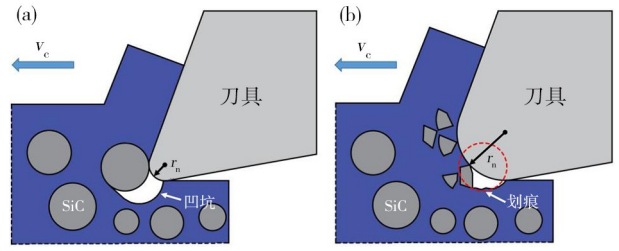
图3 不同刃口钝圆半径刀具切削时SiC颗粒受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of force on SiC particles during cutting with different cutting edge radius tools

H. A. KISHAWY等^[12]基于能量法对切削加工颗粒增强金属基复合材料中颗粒的断裂力和脱黏力进行研究,认为单个SiC颗粒脱黏和断裂引起的能量变化 dU 可以表示为:

$$\frac{dU}{d\lambda} = \left[\frac{(1-v)^2}{E} \right] \pi \sigma_{cr}^2 \lambda w \quad (1)$$

式中, σ_{cr} 为单个SiC颗粒的临界断裂应力, E 为SiC颗粒的弹性模量, v 为SiC颗粒的泊松比, w 为单个SiC颗粒断裂的裂纹扩展宽度, λ 为单个SiC颗粒断裂的



注:(a)刃口钝圆半径小于颗粒半径;(b)刃口钝圆半径大于颗粒半径。

图4 不同刃口钝圆半径刀具切削时SiC颗粒去除示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SiC particles removal during cutting with different cutting edge radius tools

裂纹扩展长度。则单个SiC颗粒的断裂能 U_{cr} 和脱黏能 U_{de} 可以分别表示为^[13]:

$$U_{cr} = \int_1^{2R} \frac{(1-v^2)}{E} 2\pi \sigma_{cr}^2 w \lambda d\lambda \quad (2)$$

$$U_{de} = \int_1^{2\pi R} \frac{(1-v^2)}{E} 2\pi \sigma_{de}^2 w \lambda d\lambda \quad (3)$$

式中, σ_{de} 为单个SiC颗粒的理论界面脱黏应力, R 为SiC颗粒的半径。其中,对于断裂颗粒,假设其初始裂纹长度为 $1 \mu\text{m}$,最终裂纹扩展长度为 $2R$;对于脱黏颗粒,假设其初始裂纹长度为 $1 \mu\text{m}$,最终裂纹扩展长度为 $2\pi R$ 。切削刃切削单颗粒后的断裂力 F_{cr} 和脱黏力 F_{de} 可以分别表示为:

$$F_{cr} = \frac{U_{cr}}{2R} \quad (4)$$

$$F_{de} = \frac{U_{de}}{2R} \quad (5)$$

最终得到切削刃作用下的颗粒断裂和脱黏力为:

$$F_{sic} = NP_{cr}F_{cr} + NP_{de}F_{de} \quad (6)$$

式中, P_{cr} 为SiC颗粒断裂的概率, P_{de} 为SiC颗粒脱黏的概率, N 为切削刃作用下SiC颗粒总损伤数。由于颗粒脱黏后被刀具刃口推动耕犁,颗粒的阻碍作用对切削力影响显著^[14]。而随着刃口钝圆半径的增大,SiC颗粒脱黏后被拔出或耕犁的概率 P_{de} 减小,直接破碎的概率 P_{cr} 增大。因此,由于颗粒脱黏对刀具刃口造成的阻碍作用减小,切削力会随着刃口钝圆半径的增大而不断减小。

图5为不同切削速度下切削力变化趋势。由图可知,随着切削速度的增大,切削力先减小后增大。当切削速度为 60 m/min 至 100 m/min 时,随着切削速度的增大,基体快速变形使得大量切削热无法及时扩散出去,从而切削温度逐渐升高,工件材料软化,复合材料的流动应力减小,使得切削力不断减小^[15];而当切削速度增大到 120 m/min 和 140 m/min 时,随着切削速度的进一步增加,加工过程逐渐转变为以切削由SiC颗粒组成的

网格状结构为主。由于其抗压强度大于抗拉强度,因此切削温度对SiC_p/Al复合材料的力学性能影响较小^[16]。同时,较高的切削速度导致材料应变率和单位时间内切削的材料体积增多,刀具接触到SiC颗粒的数量增多,因此切削力增大。

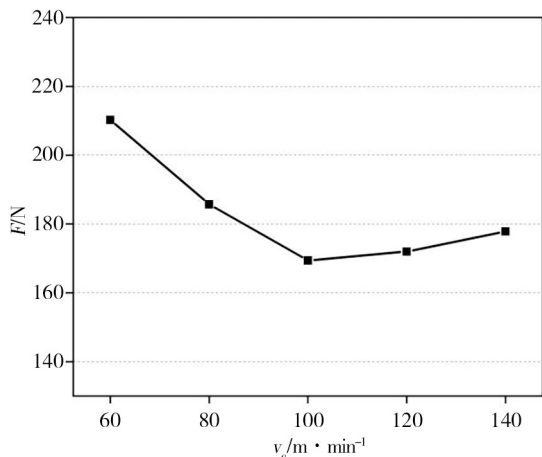


图5 不同切削速度下的切削力

Fig. 5 Cutting force under different cutting speeds

2.2 表面形貌

图6为不同刃口钝圆半径作用下SiC_p/Al复合材料铣削表面形貌。由图可知,当刃口钝圆半径为5 μm时,已加工表面出现较大的凹坑与犁沟。随着刃口钝圆半径的增大,凹坑与犁沟缺陷逐渐减少,当刃口钝圆半径增大到20 μm和25 μm时,加工表面以划痕缺陷为主。

由上述对切削力的分析可知,当刃口钝圆半径为5 μm时,铣削过程中刀具使得SiC颗粒更容易被直接拔出和耕犁,从而在加工表面形成较大的凹坑与犁沟;而随着刃口钝圆半径的增大,SiC颗粒更容易破碎,而不是直接拔出或耕犁。因此,在刀具的作用下,破碎后的颗粒在已加工表面形成了许多划痕。

此外,当刃口钝圆半径较小时,如图6(a)、(b)、(c),在凹坑周围可明显观察到由破碎颗粒造成的微小划痕;而当刃口钝圆半径为20 μm和25 μm时,已加工表面出现了许多微小的压入颗粒。这是由于较大的刃口钝圆半径导致较大的犁削面积,使得该区

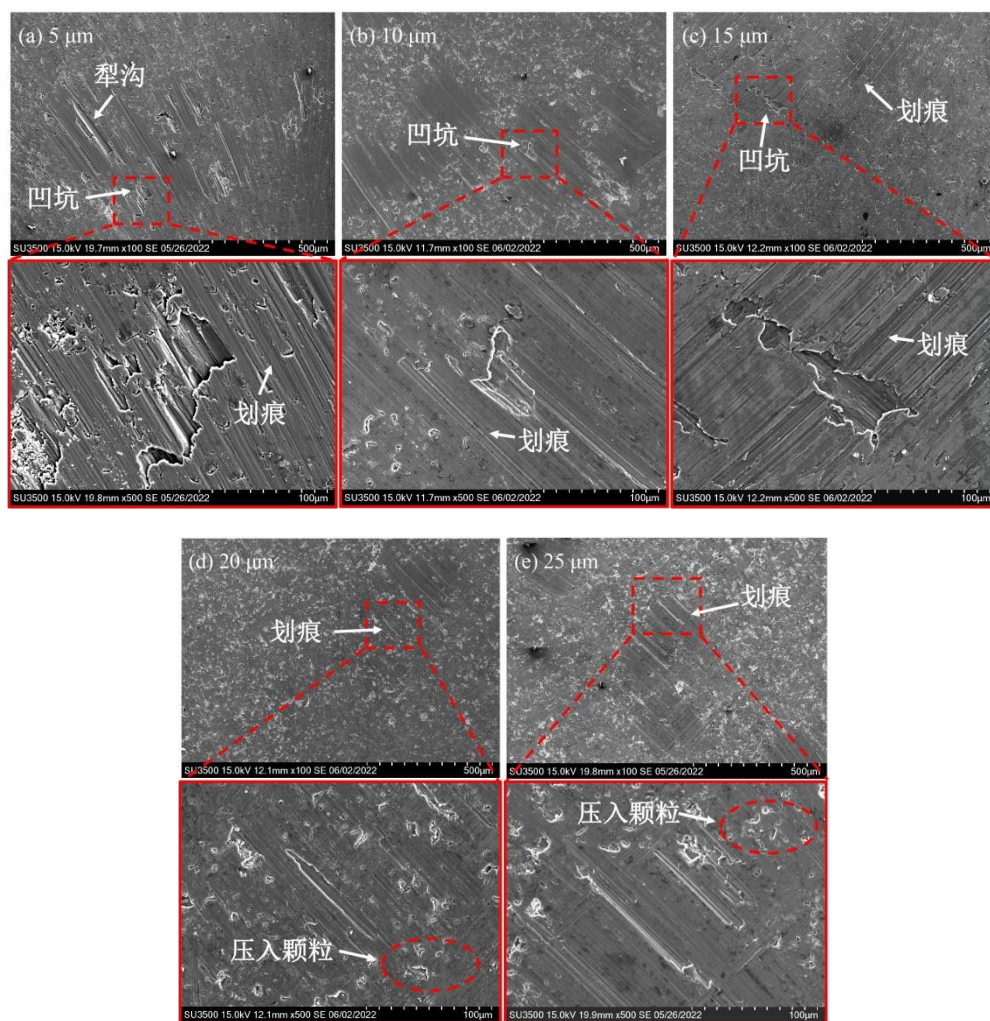


图6 不同刃口钝圆半径下的加工表面形貌

Fig. 6 Machined surface topography under different cutting edge radius

域中的更多材料被压缩,即刀口的犁削作用更加明显^[17],从而将破碎后的微小颗粒压入表面。

图7为采用刃口钝圆半径为15 μm的刀具,在不同切削速度下铣削SiC_p/Al复合材料后的加工表面形貌。当切削速度为60 m/min时,加工表面缺陷较少,

存在少量凹坑与划痕;随着切削速度的增大,加工表面的划痕缺陷逐渐增多;当切削速度增大到120 m/min时,加工表面出现较长的划痕;而当切削速度增大到140 m/min时,出现了明显的基体涂覆现象。

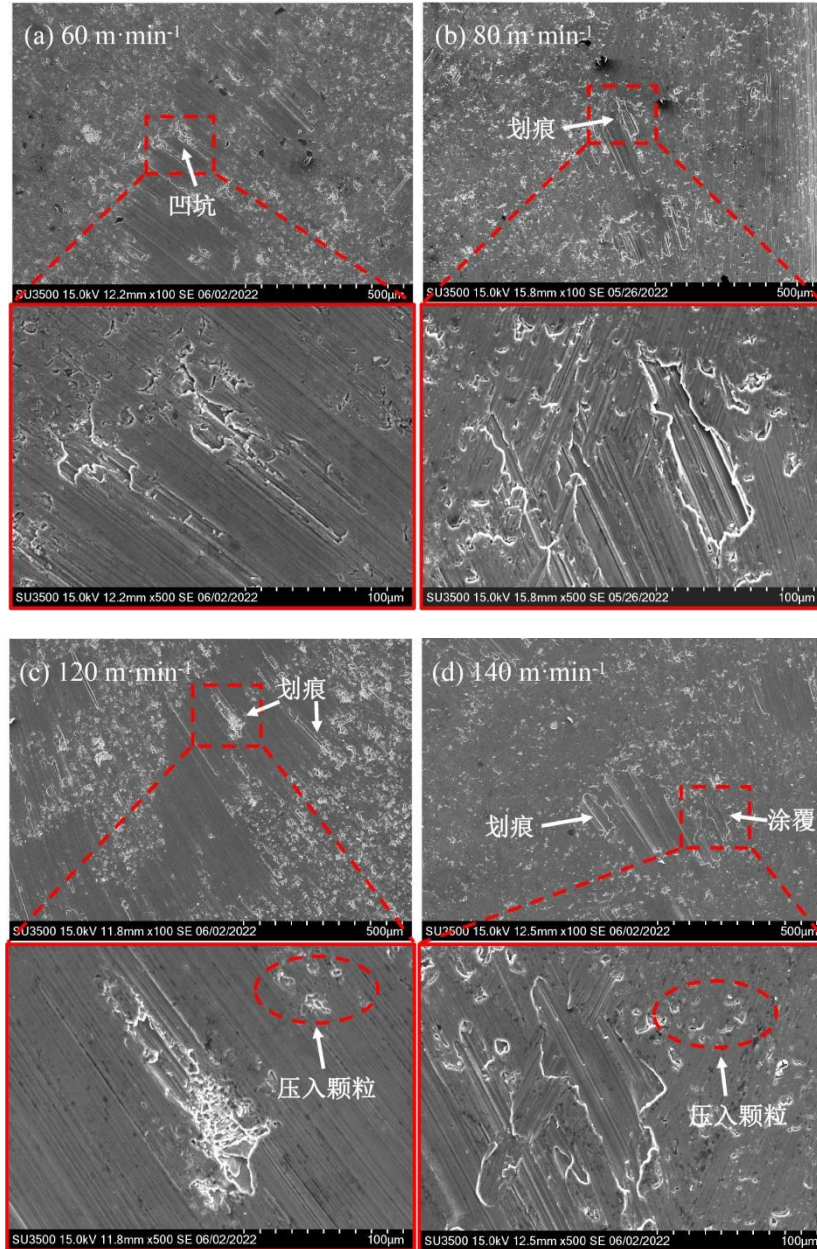


图7 不同切削速度下的加工表面形貌

Fig. 7 Machined surface topography under different cutting speeds

这是由于随着切削速度的增大,切削温度也随之增大,使得铝基体切削层软化,因此颗粒更容易被拔出^[18];同时在更高的切削速度下,SiC颗粒会被耕犁较长的距离,形成长划痕。因此当切削速度为120 m/min时,加工表面形成了较长的划痕;而随着切削速度进一步增大,切削温度持续升高,当切削速度为140 m/min时,在后刀面的熨压作用下加工表面出现

了基体涂覆的现象。此外,当切削速度增加到120 m/min和140 m/min时,可以发现在划痕周围出现了许多微小的压入颗粒,这是由于切削温度升高导致基体软化,在刀口的作用下和后刀面的熨压下破碎的微小颗粒被压入已加工表面。

2.3 表面Ra

图8展示了不同刃口钝圆半径下已加工表面Ra
宇航材料工艺 <http://www.yhelgy.com> 2024年 第5期

的变化趋势。由图可知,随着刃口钝圆半径的增大,表面 Ra 值呈不断减小的趋势。当刃口钝圆半径为 $5\ \mu\text{m}$ 时,表面 Ra 值最大。这是由于此时SiC颗粒易被整体拔出或耕犁,产生较大的凹坑和犁沟,使得表面 Ra 较大;而随着刃口钝圆半径的增大,SiC颗粒的破碎程度愈发显著,颗粒更容易在破碎后去除,而非直接拔出,因此由颗粒拔出造成的表面凹坑缺陷减少,出现更多的是表面划痕,使得表面 Ra 值不断减小。

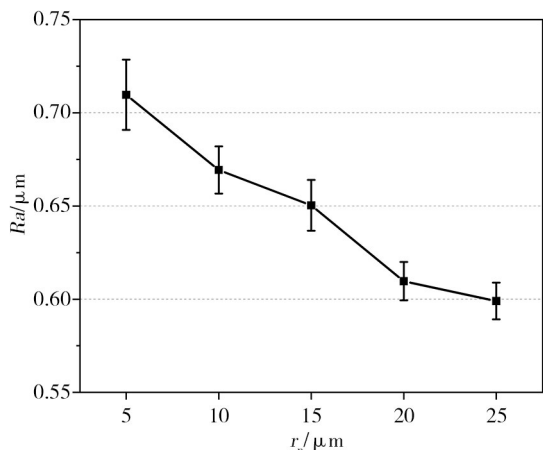


图8 不同刃口钝圆半径下的表面 Ra 值

Fig. 8 Surface roughness value under different cutting edge radius

图9为不同切削速度下加工表面 Ra 值的变化趋势。由图可知,随着切削速度的增大,表面 Ra 呈先增大后减小的趋势。这是由于切削速度的增大导致加工表面形成更多的划痕缺陷;同时热软化效应导致基体的切削层软化,这使得在颗粒去除过程中加工表面形成了更长的划痕,因此随着切削速度的增大表面 Ra 值不断增大。而当切削速度增大到 $140\ \text{m/min}$ 时,由于切削温度过高,加工表面在后刀面的熨压作用下出现了一定的基体涂覆现象,因此加工表面质量得以改善,表面 Ra 值略微下降。

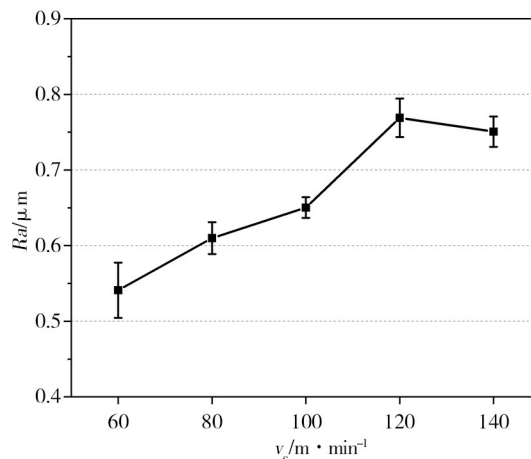


图9 不同切削速度下的表面 Ra 值

Fig. 9 Surface roughness at different cutting speeds

2.4 切屑形貌

刃口结构参数以及切削速度的改变势必导致切屑形成机理发生变化,从而影响切屑形貌。图10为不同刃口钝圆半径下切屑的宏观与微观形貌。从图中可以看到,切屑形状均为非连续的不规则锯齿状,这是由于SiC颗粒的存在引起的微裂纹聚集及扩散导致了不规则锯齿状切屑的形成^[19]。进一步观察切屑非自由表面微观形貌发现,当刃口钝圆半径较小时,切屑非自由表面存在凹坑与裂纹;随着刃口钝圆半径的增大,切屑非自由表面逐渐变得光滑;当刃口钝圆半径增大到 $25\ \mu\text{m}$ 时,表面未观察到凹坑,仅存在微裂纹。

切屑非自由表面形貌的变化进一步证明了不同刃口钝圆半径下SiC颗粒去除方式的改变。即在刃口钝圆半径较小时,颗粒更容易被直接拔出或耕犁,因此切屑非自由表面存在凹坑与裂纹;而随着刃口钝圆半径的增大,在刀具刃口的作用下,SiC颗粒更容易发生破碎,因此切屑非自由表面的凹坑与裂纹减少,逐渐变得光滑。

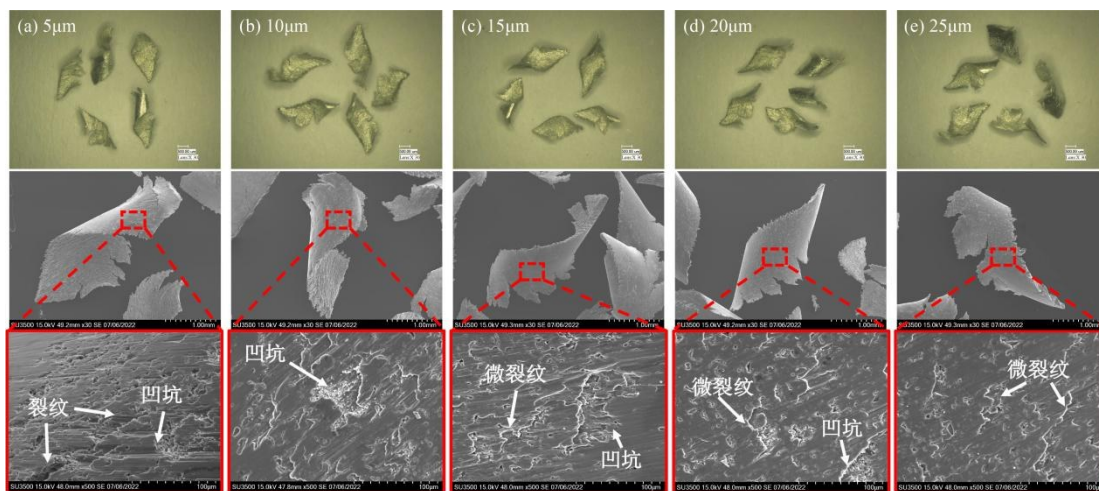


图10 不同刃口钝圆半径下的切屑形貌

Fig. 10 Chip morphology under different cutting edge radius

图 11 为不同切削速度下切屑的宏观与微观形貌。观察切屑宏观形貌可以发现,在不同切削速度下,切屑均呈非连续的不规则锯齿状。观察切屑非自由表面微观形貌可以看到,当切削速度为 60 m/min 时,表面仅存在微裂纹,随着切削速度的增加,逐渐出现了凹坑与严重的裂纹,当切削速度增加到 140 m/min 时,出现明显的颗粒耕犁痕迹。

这是因为随着切削速度的增加,切削温度增大,

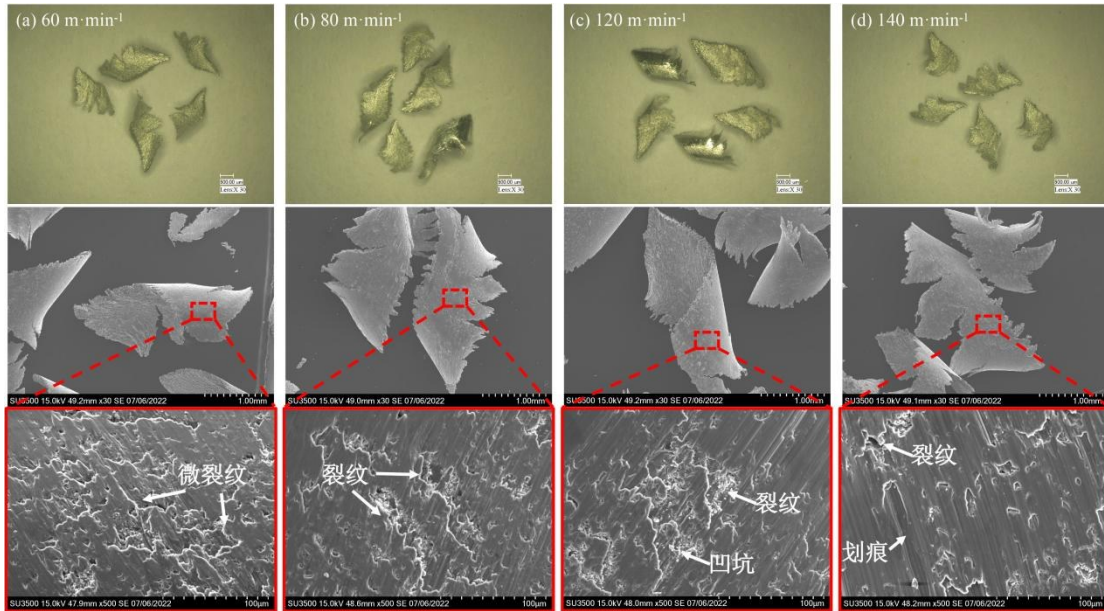


图 11 不同切削速度下的切屑形貌

Fig. 11 Chip morphology at different cutting speeds

3 结论

(1) 切削力随着刃口钝圆半径的增大而减小,当刃口钝圆半径为 25 μm 时,切削力最小,这是由于颗粒去除方式的改变降低了切削力。切削力随着切削速度的增大先减小后增大,当切削速度为 100 m/min 时,切削力最小。

(2) 随着刃口钝圆半径的增加,加工表面 SiC 颗粒的去除方式从拔出、耕犁逐渐变为破碎,表面缺陷由凹坑、犁沟转变为划痕。较大刃口钝圆半径的刀具更容易切碎颗粒。随着切削速度的增加,加工表面的划痕缺陷增多,当切削速度为 140 m/min 时出现基体涂覆现象。

(3) 随着刃口钝圆半径的增加,表面 R_a 逐渐降低;随着切削速度的增加,表面 R_a 先增大后减小。采用刃口钝圆半径较大的刀具进行 SiC_p/Al 复合材料铣削加工时,已加工表面质量可以得到改善。低速切削时,加工表面质量较好。

(4) 在不同刃口钝圆半径和不同切削速度下,切屑均为非连续的不规则锯齿状。随着刃口钝圆半径的增加,切屑非自由表面逐渐变得光滑。随着切削速度的增加,切屑非自由表面裂纹扩展严重,当切削

工件材料的延展性增加^[20],颗粒更容易被拔出,因此切屑非自由表面会产生凹坑与严重的裂纹。由图 11 (d) 可以看到,当切削速度为 140 m/min 时,切屑非自由表面存在明显的颗粒耕犁痕迹。这是由于在较高的切削温度下, SiC 颗粒在前刀面和切屑非自由表面之间产生了滚动摩擦,从而在切屑非自由表面留下了划痕。

速度增大到 140 m/min 时,切屑非自由表面出现划痕。

参考文献

- [1] DU J, ZHOU L, LI J, et al. Analysis of chip formation mechanism in mill-grinding of SiC_p/Al composites[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(11-12): 1353-1360.
- [2] 张德光, 周丽, 王洋, 等. SiC_p/Al 复合材料的加工表面质量研究进展[J]. 工具技术, 2014, 48(10): 3-6.
- [3] ZHANG D G, ZHOU L, WANG Y, et al. Progress in research of processing surface quality of SiC_p/Al composite material[J]. Tool Engineering, 2014, 48(10): 3-6.
- [4] WANG T, XIE L, WANG X, 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.
- [5] ZHANG W, ZHUANG K, PU D. A novel finite element investigation of cutting force in orthogonal cutting considering plough mechanism with rounded edge tool [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(9): 3323-3334.
- [6] PADMAKUMAR M. Effect of cutting edge form factor (K-factor) on the performance of a face milling tool [J]. CIRP 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024 年 第 5 期

Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 31: 305–313.

[6] HAN J, HAO X, LI L, et al. Milling of high volume fraction SiC_p/Al composites using PCD tools with different structures of tool edges and grain sizes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5): 1875–1882.

[7] DABADE U A, JOSHI S S, BALASUBRAMANIAM R, et al. Surface finish and integrity of machined surfaces on Al/ SiC_p composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192: 166–174.

[8] SCHUBERT A, NESTLER A. Enhancement of surface integrity in turning of particle reinforced aluminium matrix composites by tool design [J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 300–305.

[9] CLAUB B, SCHUBERT A. Milling of an aluminium matrix composite using MCD-tipped tools with adjusted corner and minor cutting edge geometries [J]. Journal of Composites Science, 2021, 5(9): 235.

[10] WYEN C F, WEGENER K. Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium [J]. CIRP Annals, 2010, 59(1): 93–96.

[11] WU X, LI L, HE N, et al. Investigation on the ploughing force in microcutting considering the cutting edge radius [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9): 2441–2447.

[12] KISHAWY H A, KANNAN S, BALAZINSKI M. An energy based analytical force model for orthogonal cutting of metal matrix composites [J]. CIRP Annals, 2004, 53(1): 91–94.

[13] 孙伟. 切削 SiC_p/Al 复合材料的颗粒损伤机理及理论建模研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

SUN W. Study on particle damage mechanism and theoretical modeling of SiC_p/Al composite cutting [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[14] DENG B, ZHOU L, PENG F, et al. Analytical model of cutting force in micromilling of particle-reinforced metal matrix composites considering interface failure [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(8): 081009.

[15] 范依航, 战纯勇, 郝兆朋. $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 复合材料高应变率热变形行为的新本构模型 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(11): 1346–1353.

FAN Y H, ZHAN C Y, HAO Z P. A new constitutive model for hot deformation behavior of $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ composites under high strain rate [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(11): 1346–1353.

[16] ZHANG P, YUE X, ZHANG Q, et al. Investigation on the influence of SiC particle parameters on the machinability of SiC_p/Al composite [J]. Vacuum, 2021, 191: 110340.

[17] LI B, ZHANG S, YAN Z, et al. Influence of edge hone radius on cutting forces, surface integrity, and surface oxidation in hard milling of AISI H13 steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(1): 1153–1164.

[18] LI M, WANG Z, LI W, et al. Modeling and experimental study on tool-particle interaction and surface integrity in milling SiC_p/Al metal matrix composites [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2022, 236(11): 1535–1550.

[19] NIU Q, JING L, LI C, et al. Study on effects of tool nose radius on the formation mechanism of edge defects during milling SiC_p/Al composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(7): 2261–2269.

[20] DABADE U A, JOSHI S S. Analysis of chip formation mechanism in machining of Al/ SiC_p metal matrix composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4704–4710.